



Universidad
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TRABAJO FIN DE GRADO

**"EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA
ELECTROINTENSIVA SECTORES:
METALURGIA, SIDERURGIA Y PAPEL"**

Autor: Diego Martínez Gutiérrez

Tutor: Fernando Soto Martos

Leganés, Junio de 2014

Índice de contenidos

	Pág.
Capítulo 1. Introducción	7
1.1. Introducción	7
1.2. Objetivos del TFG.....	8
1.3. Estructura del documento.....	9
Capítulo 2. Definiciones y conceptos de ahorro y eficiencia energética.....	10
2.1. Eficiencia energética	10
2.2. Método y ámbito de aplicación de la eficiencia energética en la industria.....	11
2.2.1. Auditoría energética	11
2.2.2. Empresas de servicios energéticos	13
2.2.3. Sistema de gestión o supervisión energética	15
2.3. Demanda energética industrial.....	16
2.3.1. Gestión de la demanda	18
2.4. Indicadores relativos al ámbito energético.....	20
2.5. Otros conceptos de importancia	26
Capítulo 3. Contexto energético y de eficiencia actual	28
3.1. Contexto energético y de eficiencia internacional	28
3.1.1. El sector industrial en el contexto internacional	33
3.1.2. Iniciativas y tratados internacionales relativos al ahorro y la eficiencia energética ...	36
3.2. Contexto energético y de eficiencia en España.....	39
3.2.1. El sector industrial en España	44
3.2.2. Normativas y planes de ahorro y eficiencia energética en Europa y España.....	50
Capítulo 4. Análisis de sistemas y procesos industriales generales	60
4.1. Motores eléctricos y variadores de velocidad	60
4.2. Compensación de energía reactiva.....	73
4.3. Filtrado de armónicos.....	79
4.4. Iluminación	82
4.5. Cogeneración	86
Capítulo 5. Industria del papel	93
5.1. Proceso producción del papel	94
5.1.1. Proceso de producción de la pulpa o pasta de papel	94
5.1.2. Proceso de fabricación del papel.....	98
5.2. Mejoras de eficiencia energética.....	100
5.2.1. Mejoras en el proceso de fabricación de pasta Kraft	101
5.2.2. Mejoras en el proceso de fabricación de pasta al sulfito.....	102
5.2.3. Mejoras en el proceso de fabricación de pasta mecánica y quimicomecánica	103
5.2.4. Mejoras en el proceso de papel recuperado	104
5.2.5. Mejoras en el proceso de fabricación de papel	105

Capítulo 6. Industria siderúrgica	107
6.1. Proceso producción de acero.....	108
6.1.1. Proceso siderúrgico integral	108
6.1.2. Proceso no integral de producción del acero.....	110
6.2. Mejoras de eficiencia energética.....	112
6.2.1. Mejoras de carácter general.....	112
6.2.2. Mejoras en las plantas de sinterización	113
6.2.3. Mejoras en las plantas de peletización	114
6.2.4. Mejoras en los hornos de coque	114
6.2.5. Mejoras en altos hornos.....	114
6.2.6. Mejoras en el convertidor de oxígeno	116
6.2.7. Mejoras en el horno de arco eléctrico	116
Capítulo 7. Industria metalúrgica	117
7.1. Industria del cobre.....	118
7.1.1. Proceso de producción del cobre.....	118
7.1.1.2. Método pirometalúrgico	118
7.1.1.2. Método hidrometalúrgico	120
7.2. Industria del aluminio	121
7.1.1. Proceso de producción del aluminio	121
7.3. Mejoras de eficiencia energética.....	123
7.3.1. Mejoras en el proceso de producción de cobre	123
7.3.2. Mejoras en el proceso de producción del aluminio.....	124
Capítulo 8. Cronograma.....	126
Capítulo 9. Presupuesto.....	126
Capítulo 10. Conclusiones	127
10.1. Conclusiones técnicas	127
10.2. Conclusiones personales	128
Capítulo 11. Referencias bibliográficas	129

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1: Metodología de actuación para el desarrollo de una auditoría en el sector industrial	13
Figura 2: Evolución del consumo energético mundial	28
Figura 3: Prospectiva de consumo energético mundial para el año 2035.....	28
Figura 4: Distribución geográfica del consumo energético en el mundo, año 2012	29
Figura 5: Peso de cada país en el consumo mundial.....	29
Figura 6: Dependencia energética mundial por regiones.....	30
Figura 7: Horizonte de agotamiento de las fuentes de energía no renovable	30
Figura 8: Evolución mundial de los requerimientos de fuentes primarias de energía.....	30
Figura 9: Mapa mundial de eficiencia energética.....	31
Figura 10: Evolución global de la intensidad energética, periodo 1990-2012	32
Figura 11: Explotación del potencial de la eficiencia energética, horizonte 2035	32
Figura 12: Sistema energético global.....	33
Figura 13: Evolución del consumo de fuentes de energía secundaria por sector económico.....	34
Figura 14: Tendencia mundial de la intensidad energética en la industria.....	35
Figura 15: Valores relativos de intensidad energética en la industria por regiones	35
Figura 16: La etiqueta energética.....	38
Figura 17: Número de países en cada región mundial con sistemas de etiquetado energético	38
Figura 18: Evolución de la estructura sectorial del PIB	39
Figura 19: Evolución del VAB en España por sectores.....	39
Figura 20: Evolución del PIB por áreas y países (porcentaje de variación interanual)	39
Figura 21: Evolución de la estructura sectorial de la demanda energética final.....	40
Figura 22: Evolución y estructura del consumo energético por fuentes de energía primaria.....	40
Figura 23: Evolución de la generación eléctrica renovable	41
Figura 24: Mapa de suficiencia energética en Europa por países	41
Figura 25: Evolución del grado de autoabastecimiento de España	41
Figura 26: Evolución de la dependencia energética, UE-27.....	41
Figura 27: Evoluciones de la aportación primaria renovable y del grado de dependencia energética en España.....	42
Figura 28: Comparativa europea de la intensidad energética a nivel macro (expresadas en moneda del año 2000).....	43

Figura 29: Distribución porcentual de los consumos energéticos por agrupaciones de actividad	44
Figura 30: Configuración del consumo industrial final en España por tipo de fuente de energía.....	44
Figura 31: Evolución de la participación en el PIB de la industria y del sector terciario.....	45
Figura 32: Evolución del VABI frente al PIB (2003-2012), tasas de variación interanual (porcentaje)	45
Figura 33: Tendencias de consumo energético y producción industrial en la Unión Europea.....	46
Figura 34: Porcentajes de participación industrial sobre el VAB nacional y sobre el VABI total de la Zona Euro.....	47
Figura 35: Comparativa Europea de la Intensidad Energética del Sector Industria (base moneda del año 2000)	47
Figura 36: Evolución comparativa de la intensidad energética de las ramas industriales más intensivas (España).....	47
Figura 37: Comparación respecto a Europa de la intensidad energética en industrias cemento, acero y papel	48
Figura 38: Precios de la electricidad en Europa para consumidores industriales 2013 (€/kWh)	49
Figura 39: Escenarios tendenciales de reducción de consumo energético de 20%	53
Figura 40: Esquema cronológico de los Planes y Estrategias de Ahorro y Eficiencia Energética en España.....	53
Figura 41: Ahorros de energía y emisiones proyectadas en el plan 2011-2020 para el sector industrial	56
Figura 42: Ahorros de energía final por sectores respecto a 2007 (en ktep y en porcentaje respecto al total de consumo del sector).....	57
Figura 43: Evaluación de ahorros y emisiones evitadas por sectores, periodo 2004-2010	58
Figura 44: Distribución sectorial del efecto de las mejoras de eficiencia energética en el aumento del VAB, 2009.....	59
Figura 45: Usos finales del consumo eléctrico mundial / Peso de los motores en el consumo eléctrico total por sector.....	60
Figura 46: Consumo eléctrico de motores por tipos de uso y por sectores industriales	61
Figura 47: Pérdidas en un motor eléctrico	62
Figura 48: Clasificación según la norma EN 60034-30/EN 60034-31 de la Comisión Electrotécnica Internacional	63
Figura 49: Línea cronológica de implantación de clases de eficiencia mínima obligatoria en diferentes países.....	65

Figura 50: Coste relativo de adquisición de motores según su clase de eficiencia	66
Figura 51: Variadores de velocidad	69
Figura 52: Composición de un variador de velocidad	70
Figura 53: Factores del Coste de Ciclo de Vida de un motor con convertidor.....	71
Figura 54: Triangulo de potencias / Consumo de potencias en una carga inductiva.....	73
Figura 55: Potencias en una carga inductiva con compensación / Batería automática de condensadores	76
Figura 56: Diferentes configuraciones para compensación de energía reactiva.....	77
Figura 57: Armónicos	79
Figura 58: Horno de arco eléctrico	80
Figura 59: Lámparas y luminarias según la altura	83
Figura 60: Iluminación LED frente a iluminación con lámparas de vapor de sodio	83
Figura 61: Eficacia lumínica de cada tipo de lámpara	84
Figura 62: Campana y tubo LED	84
Figura 63: Cogeneración frente a producción separada de calor y electricidad	86
Figura 64: Ejemplos de sistemas de cogeneración	87
Figura 65: Distribución de cogeneración por tipo de tecnología / Flujos energéticos en la cogeneración	88
Figura 66: Potencia de cogeneración en España por CCAA / Distribución de la cogeneración por sectores	89
Figura 67: Déficit de tarifa / Evolución de la potencia instalada de cogeneración 1997-2011	91
Figura 68: Industria del papel	93
Figura 69: Industria siderúrgica	107
Figura 70: Fases y materiales del proceso siderúrgico	110
Figura 71: Industria metalúrgica.....	117
Figura 72: Cronograma.....	126

Índice de tablas

Pág.

Tabla 1: Tabla de clases de eficiencia definidas por la norma EN 60034-30/IEC/60034-30 para algunas de las potencias recogidas en ella	62
Tabla 2: Equivalencia entre sistemas de clasificación de motores eléctrico	64
Tabla 3: Factores de potencia de los elementos industriales más comunes.....	74
Tabla 4: Comparativa de penalizaciones económicas por energía reactiva 2009-2010	75
Tabla 5: Evolución de la potencia de cogeneración instalada en la industria del papel	90
Tabla 6: Cifras de la cogeneración por sectores en 2004	91
Tabla 7: Cifras relativas a la instalación de nuevos sistemas de cogeneración en la industria (Plan 2011-2020)	92

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

La evolución de la economía de un país y la competitividad de su industria están fuertemente marcadas por el precio de la energía y la adecuada gestión de ésta. El impacto de este hecho en la economía y en el sector industrial en España es especialmente significativo debido a que el nivel de dependencia energética alcanza niveles de en torno al 75%, tasa incluso superior a la de los países del entorno europeo.

Una parte muy significativa en la estructura de costes de toda industria es la correspondiente al consumo de energía, especialmente en las industrias electrointensivas como son la del papel, la siderúrgica y la metalúrgica, que serán objeto de estudio en este TFG. En ellas, el precio de compra de la electricidad define en gran medida el coste final de los productos y con ello su competitividad.

El contexto energético en el que vivimos está cada vez más marcado por un clima de debate y preocupación sobre el ahorro y la eficiencia energética a todos los niveles. Este clima está producido por la confluencia de un desenfrenado aumento del consumo energético en el mundo, junto a una serie de circunstancias muy determinantes:

- El progresivo agotamiento de las fuentes de energía no renovable o la no rentabilidad de su explotación, especialmente el petróleo, da lugar a un continuo aumento de precios que llegará a ser insostenible.
- El impacto medioambiental y a la toma de conciencia colectiva de actuar frente al cambio climático, disminuyendo las emisiones y reduciendo el consumo energético.
- La gran dependencia que existe respecto a las regiones con reservas de combustibles fósiles, que hace que el suministro esté sujeto a circunstancias políticas que pueden ser poco estables, produciendo incertidumbre, fluctuaciones en el precio y crisis energéticas.
- La recesión económica comenzada en el año 2008, en la que se encuentran sumidos la mayor parte de los países del mundo desarrollado produce que todo ahorro sea especialmente bien recibido.

Este panorama tan condicionante pone de manifiesto la insostenibilidad del modelo energético actual, y hace necesario reaccionar tomando medidas al respecto. La solución pasa en gran medida por reducir la dependencia de combustibles fósiles externos para conseguir un sistema más autosuficiente.

Esta dependencia se puede abordar desde el ámbito de la oferta, fomentando tecnologías autóctonas limpias o alternativas, o desde el ámbito de la demanda, actuando sobre la forma y cantidad con la que se consume la energía con la eficiencia energética como principal herramienta, buscando el ahorro gracias a mejoras técnicas y a la optimización de los equipos.

El presente TFG estudia, en lo relativo a esta última vía para la mejora de la situación energética y la competitividad, el estado general y las posibilidades de mejora para la industria electrointensiva, profundizando en particular en las industrias del papel siderúrgica y metalúrgica.

1.2. Objetivos del TFG

Objetivos principales:

- Descripción y análisis de los sistemas generales presentes en sector industrial electrointensivo, identificando y valorando las mejores tecnologías horizontales existentes para mejora de la eficiencia energética.
- Descripción y estudio en detalle de los procesos y sistemas industriales de carácter vertical presentes en los sectores metalúrgico, siderúrgico y papel. Identificación de las mejores técnicas disponibles (MTD) relativas a la mejora de la eficiencia energética en sus procesos productivos.

Objetivos secundarios:

- Descripción y análisis del contexto energético y de eficiencia nacional e internacional en el ámbito general y para el sector industrial en particular.
- Revisión de la principal normativa por la que se rigen las medidas de eficiencia energética a nivel nacional e internacional.

1.3. Estructura del documento

- En el capítulo 2 se describe el significado y la interpretación de los conceptos y términos cuyo conocimiento es de utilidad para la adecuada comprensión de los posteriores capítulos del TFG.
- En el capítulo 3 se hace un repaso del panorama energético y de eficiencia mundial atendiendo a las principales cifras e indicadores al respecto. Se lleva a cabo el mismo ejercicio para el sector industrial en particular y se detallan las iniciativas y tratados internacionales relativos al ahorro y la eficiencia energética.

De igual forma se analiza la situación y relación de los aspectos económico, energético y de eficiencia en España y del sector industrial español, con una revisión de la principal normativa a nivel nacional y europeo por la cual se han regido y se rigen las medidas de eficiencia energética.

- El capítulo 4 consta del estudio y descripción de las tecnologías y sistemas industriales generales, estableciendo comparaciones técnico-económicas de las distintas tecnologías disponibles para cada uno de ellos.
- En los capítulos 5, 6 y 7 se describe el proceso de productivo de cada una de las tres industrias en las que se centra el presente documento hasta el grado de detalle preciso para la comprensión de las mejores técnicas disponibles relativas a la eficiencia energética que se proponen.
- Los capítulos 8 y 9 constan respectivamente del cronograma desglosado del desarrollo del TFG y un detalle de los principales costes económicos que se han producido.
- El capítulo 10 recoge las conclusiones técnicas y personales extraídas tras la realización del TFG.
- El capítulo 11 se compone de un listado de todas las referencias bibliográficas utilizadas divididas por capítulos y acompañadas de enlaces web para su consulta.

Capítulo 2. Definiciones y conceptos de ahorro y eficiencia energética

2.1. Eficiencia energética

La eficiencia energética se define como la relación entre la cantidad producida de un servicio o utilidad y la energía consumida para proporcionarlo. Una mejora de la eficiencia energética implica producir la misma cantidad consumiendo menos energía, o bien producir más cantidad consumiendo la misma energía. En la medida que el ratio de energía por unidad producida o por servicio prestado sea cada vez menor, aumenta la eficiencia energética.

Es frecuente la asociación del concepto “eficiencia energética” con el racionamiento o la limitación en el uso de la energía. Sin embargo, sus objetivos consisten en la óptima gestión y aprovechamiento de la energía, sin que por ello se vea resentido el resultado final o la calidad de vida del usuario.

A gran escala, los objetivos más importantes que persigue la eficiencia energética son el ahorro de costes energéticos, el refuerzo de la seguridad de abastecimiento de energía, el cumplimiento los acuerdos políticos existentes, la protección del medio ambiente y la creación de una política energética más sostenible.

La mejora de la eficiencia energética requiere habitualmente de mejoras técnicas como la sustitución o reingeniería de los sistemas o procesos presentes, lo que tiene como consecuencia un ahorro de energía. Para conseguir el objetivo de máximo ahorro en el ámbito industrial, además de las mejoras técnicas de eficiencia, son importantes otras consideraciones como el fomento de comportamientos, métodos de trabajo y técnicas de producción enfocados a la reducción del consumo y la optimización.

En la industria, el alcance de la eficiencia abarca no solamente lo relativo a la energía, sino que concierne también aspectos como la minimización del uso de materias primas, el aprovechamiento de residuos industriales, la reutilización de material defectuoso o el control de calidad y monitorización para asegurar que el proceso productivo se mantiene dentro de los parámetros correctos.

2.2. Método y ámbito de aplicación de la eficiencia energética en la industria

Las medidas para la mejora de la eficiencia energética se pueden clasificar entre las aplicables a los sistemas generales presentes en la mayoría de las plantas industriales, y las medidas que son específicas para cada sector industrial. Estas últimas dependen de las características y procesos particulares de la planta en cuestión.

Algunos ejemplos de tecnologías horizontales o de ámbito general, que se estudiarán en detalle más adelante, tienen que ver con lo relativo a los siguientes aspectos:

- Iluminación.
- Motores eléctricos.
- Implantación de sistemas de cogeneración.
- Compensación de energía reactiva.
- Filtrado de armónicos.

El proceso para la implantación de mejoras exige en primer lugar localizar dónde se debe actuar identificando qué medidas es necesario aplicar para la optimización y posteriormente estudiar su rentabilidad. El procedimiento que se encarga de llevar a cabo este proceso es la auditoría energética.

2.2.1. Auditoría energética

La Directiva 2006/32 CE del Parlamento Europeo define el término auditoría energética como "el procedimiento sistemático para obtener conocimientos adecuados del perfil de consumo de energía existente de un edificio o grupo de edificios, de una instalación industrial y/o de un servicio privado o público, para determinar y cuantificar las posibilidades de ahorro de energía y elaborar un informe al respecto"¹

Gracias a la auditoría energética es posible evaluar el desempeño de los equipos y sistemas que consumen energía en una instalación. Es una actividad multidisciplinaria, que involucra diversos campos de la ingeniería tales como la electricidad, la termodinámica, la mecánica, la hidráulica, la neumática, el control o la informática, junto con aspectos ambientales, administrativos y de evaluación económica de proyectos.

¹ Directiva 2006/32 CE del Parlamento Europeo del Consejo, 5 de abril de 2006.[1]

En una auditoría se analizan las necesidades energéticas de la instalación auditada, ya sean de gas, electricidad, vapor o aire comprimido, integrando todos los equipos y sistemas que forman parte de ella, y proponiendo soluciones que sean viables técnica y económicamente.

Los objetivos que persigue son: [2]

- Inventariar los principales equipos e instalaciones existentes.
- Conocer la situación general de la instalación y los puntos críticos.
- Identificar dónde y cómo se producen los consumos de energía y los factores que afectan a dichos consumos.
- Detectar y evaluar las posibilidades de ahorro de costes y de mejora de la eficiencia energética.
- Optimizar los consumos energéticos.
- Mejorar la contratación de energía eléctrica y combustibles.
- Eliminar las pérdidas de energía.

El procedimiento para la realización de una auditoría energética industrial sigue los siguientes puntos: [3]

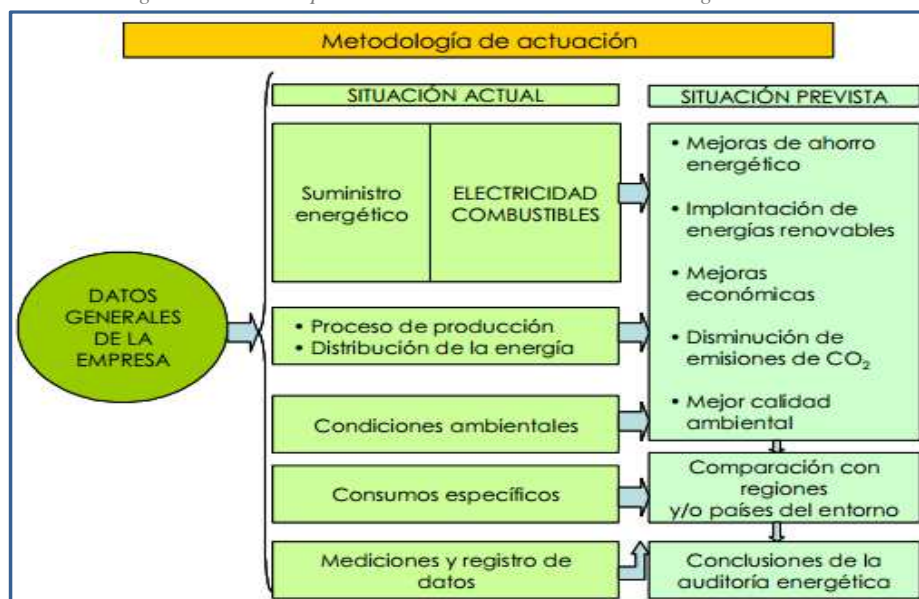
- Acuerdo de un presupuesto para el alcance deseado.
- Realización de la auditoría: inventario, mediciones, evaluación...
- Estudio de rentabilidad
- Obtención de resultados y presentación de los mismos al cliente
- Supervisión de los resultados y realización de posteriores chequeos

Estos puntos se llevan a cabo a lo largo de tres fases técnicas de desarrollo: [3]

- **Fase de diagnóstico de la situación:** consiste en el estudio de la situación actual de la instalación que se pretende auditar, según el tipo de empresa, la localización, el entorno, los suministros energéticos y los sistemas consumidores de energía.
- **Fase de desarrollo:** recoge mediciones de los principales parámetros y el análisis de documentación, datos y estudio de mejoras.
- **Fase final:** incluye la redacción del informe técnico y económico (estudio de rentabilidad) de auditoría con la situación final prevista, aportando las posibles mejoras energéticas, económicas y ambientales.

A continuación se incluye un esquema explicativo sobre el desarrollo de una auditoría para el sector industrial:

Figura 1: Metodología de actuación para el desarrollo de una auditoría energética en el sector industrial



Fuente: Comunidad de Madrid, DG de Industria, Energía y Minas, Procedimiento de auditorías energéticas en el sector industrial

2.2.2. Empresas de servicios energéticos

El proceso de auditoría y mejora de una instalación es realizado habitualmente por una Empresa de Servicios Energéticos (en adelante ESE). Una ESE es definida por la Directiva Europea 2006/32/CE como “la persona física o jurídica que proporciona servicios energéticos o de mejora de la eficiencia energética en las instalaciones o locales de un usuario y afronta cierto grado de riesgo económico al hacerlo. El pago de los servicios prestados se basará (en parte o totalmente) en la obtención de mejoras de la eficiencia energética y en el cumplimiento de los demás requisitos de rendimiento convenidos”.

Las ESEs proporcionan servicios energéticos o de mejora de la eficiencia energética en las instalaciones del cliente y asumen el riesgo del proceso al realizar toda la inversión y condicionar los beneficios al cumplimiento del objetivo de ahorro previamente fijado, garantizando al cliente la amortización de la inversión. Es decir, la ESE mejora la eficiencia de forma que el pago por sus servicios prestados se basa en el ahorro generado.

Una empresa de servicios energéticos diseña, ejecuta, opera y gestiona un proyecto de eficiencia energética. De este modo, la actividad de una ESE comprende tanto la auditoría energética como el diseño del proyecto, la instalación de los equipos, el control y mantenimiento de los mismos, y la medición de los resultados obtenidos.

Las ESEs están enfocadas fundamentalmente a aquellas empresas que desean externalizar en la mayor medida posible los aspectos energéticos de su actividad para centrarse en su tarea principal. En la actualidad, están más orientadas al ámbito de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) que al de la gran industria, aunque se prevé una mayor aplicación de sus servicios al sector industrial en el futuro. Su contratación presenta las siguientes ventajas: [4]

- La empresa cliente no compromete su capacidad de endeudamiento en un proyecto ajeno a su objeto de negocio.
- La empresa cliente se concentra en su área de negocio mientras que la ESE se dedica a realizar el ahorro energético.
- Rapidez en el desarrollo del proyecto debido a que el cobro por el trabajo realizado por la ESE se produce cuando la instalación está en funcionamiento y dando resultados positivos.
- La empresa cliente transfiere riesgos técnicos y financieros.
- La inversión que tiene que realizar la empresa cliente es nula o muy baja
- Los pagos que tiene que realizar la empresa cliente estarán condicionados a los ahorros reales que se vayan obteniendo.

En el momento de la contratación de una empresa de servicios energéticos es fundamental fijar aspectos clave como son la metodología a utilizar para la medida de los ahorros proyectados por la ESE, el sistema de eventuales penalizaciones o de plazos y de reparto de los beneficios.

Una tarea imprescindible previa a cualquier actuación o mejora técnica es la evaluación de la rentabilidad del proyecto. Esta evaluación se lleva a cabo en base al estudio del caso concreto, realizando las mediciones y estimaciones pertinentes para precisar de potencial de ahorro económico. Este criterio, es por encima de cualquier otro, el que determina si el proyecto se materializa en su fase técnica o bien se aborta antes de llegar a la misma por no cumplirse las expectativas de rentabilidad esperadas.

La medida y verificación es un proceso que consiste en evaluar forma fiable el ahorro real generado en la instalación, pero la determinación de los ahorros no es una tarea sencilla ya que éstos no se pueden calcular sencillamente como la diferencia entre el consumo antes y después de la implantación de las medidas, dado que el consumo puede variar por otros factores como el clima, factor de utilización, nivel de producción, etc.

El proceso de medida y verificación comprende las siguientes actividades: [5]

- Desarrollo de un método adecuado de cálculo del ahorro.
- Instalación, calibración y mantenimiento de los equipos de medida.
- Recopilación, procesado y análisis de los datos.
- Realización de los cálculos con las lecturas obtenidas.
- Elaboración de informes y comprobación de los mismos por terceras partes, para tener garantía de independencia y objetividad.

2.2.3. Sistema de gestión o supervisión energética

Un sistema de gestión energética, consiste en la integración de un método para la recogida, la monitorización, el análisis y la documentación de datos energéticos, así como para la regulación y el control del consumo energético en una planta industrial. Constituye una herramienta indispensable para alcanzar y mantener los objetivos del ahorro energético.

Los requisitos para la implantación, el mantenimiento y la mejora de un sistema de gestión de la energía están recogidos en la norma UNE-EN ISO 50001, aplicable a cualquier empresa independientemente del tamaño o sector al que pertenezca. El estándar incluye especificaciones relacionadas con todos los factores que intervienen en el desempeño energético de una instalación.

En un sistema de gestión energética los dispositivos de medición recogen un flujo de información constante de las instalaciones que permite entender sus consumos energéticos (agua, aire, gas, electricidad o vapor) y como se están produciendo, para poder adoptar manual o automáticamente las medidas correctivas oportunas. La adecuada implementación del sistema de medición de estos parámetros constituye la base del sistema de gestión energética:

“Lo que no se puede medir no se puede controlar; lo que no se puede controlar no se puede gestionar; lo que no se puede gestionar no se puede mejorar.”

Peter Drucker [6]

El sistema presenta la información previamente tratada de forma que la extracción de conclusiones sea inmediata. Resulta también de gran utilidad para la asignación de costes y tarificación, el cálculo de ratios, la comprobación del cumplimiento de objetivos, benchmarking, análisis del perfil de carga y calidad de la energía, y la supervisión y mantenimiento de las instalaciones. [7]

2.3. Demanda energética industrial

Se entiende como demanda energética de un país o región, la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades de sus habitantes y su ritmo de desarrollo económico. A efectos de su utilización, la energía puede clasificarse en energía primaria, secundaria o final.

Se considera energía primaria a la presente en los recursos naturales antes de ser sometidos a ningún proceso de conversión o transformación. La energía primaria se encuentra contenida en fuentes naturales como el petróleo crudo, el carbón mineral, el gas natural, la energía solar, el viento, el agua embalsada o el uranio.

Si la fuente de energía primaria no es utilizable directamente y requiere de algún tipo de modificación física o química para su uso, debe ser transformada en energía secundaria, como la electricidad o las gasolinas, la cual, después de su almacenamiento y transporte, es apta para su consumo directo en forma de energía útil o final, proporcionando energía lumínica, térmica o mecánica. En algunos casos, como el del gas, la fuente de energía primaria puede ser transformada en energía final de forma directa, pero lo más habitual es la obtención de energía final a partir de una fuente de energía secundaria.

Por efecto de las leyes termodinámicas, la energía secundaria siempre va a ser menor que la energía primaria, y la energía final entregada al consumidor siempre va a ser menor que la energía secundaria. Esto se puede apreciar claramente mediante el ejemplo de un panel fotovoltaico, el cual no aprovecha toda la energía solar que le llega para generar electricidad, y a su vez, no toda la energía eléctrica generada por el panel es aprovechada en una bombilla para producir luz.

Cuando se habla de energía primaria en términos macroscópicos, ésta se refiere a los insumos totales que un sistema económico necesita de este tipo de energía, y se entiende como energía final la suma de las energías consumidas en cada uno de los sectores económicos del sistema: transporte, industrial, residencial, servicios...

La demanda energética del sector industrial está compuesta por aportes de distintas fuentes de energía, tales como gasóleo, fueloil, gas, carbón o electricidad, siendo ésta última la responsable, para el promedio industrial, de entorno al treinta por ciento de su consumo energético total, seguida por el gas con algo menos del treinta por ciento, según datos del IDAE. [8]

Por consiguiente la energía eléctrica se posiciona como una de las materias primas más importantes para el funcionamiento del sector industrial, siendo éste, junto a los sectores residencial y servicios, uno de los consumidores de energía eléctrica con más peso en el sistema, con un consumo aproximado del treinta por ciento del total [8].

Los sectores residencial y servicios se caracterizan por un elevado número de consumidores con un bajo consumo, mientras el sector industrial se caracteriza por un pequeño número de consumidores con un alto consumo. El elevado consumo de energía eléctrica en la industria se debe a la gran potencia de la maquinaria y los procesos de los que consta.

El coste de la energía eléctrica tiene por tanto un gran impacto en la salud y competitividad del sector industrial, como recurso indispensable que es para su funcionamiento. Esto repercute también en la fortaleza de la economía del país dado el importante papel de la industria en la generación de riqueza, la creación de puestos de trabajo o el precio final de los bienes.

La energía eléctrica tiene la particularidad de no poder ser almacenada a gran escala, de modo que el suministro y el consumo eléctrico deben ajustarse de forma que en cada momento la generación sea igual a la demanda. Este hecho hace necesaria la continua regulación del sistema eléctrico mediante la monitorización y el análisis de información.

El estudio de la demanda eléctrica muestra que existe un patrón de consumo determinado por parte de los usuarios que se repite diariamente con pequeñas variaciones. Esto da lugar al denominado perfil o curva de la demanda, que ilustra la potencia consumida en cada momento del día. Tanto la forma de ésta curva, como la distribución horaria de precios pueden verse afectadas por diversos factores como la climatología, la estación del año, los hábitos de los consumidores, la estructura productiva de la economía o el precio de los combustibles para las centrales de generación.

La industria electrointensiva, objeto de estudio en el presente Trabajo de fin de Grado, presenta una estructura de costes productivos en la que uno de los mayores importes, si no el mayor, es el atribuido al consumo eléctrico, con un peso de entre el 10 y el 40 por ciento de dichos costes. Por ello, su situación es especialmente vulnerable a las fluctuaciones del precio de la energía eléctrica o a las distintas políticas energéticas existentes.

El perfil de consumo del sector industrial electrointensivo se caracteriza por un elevado consumo en las horas valle del sistema, donde se cubre más del 60 por ciento de su demanda de energía eléctrica, presentando consumos más reducidos en horas punta, aunque sin grandes variabilidades en la potencia consumida en una y otra situación.

Esto hace que el perfil de carga de la industria electrointensiva tenga un ratio de potencia punta-valle en torno a 0,67 mientras que el ratio del sistema se sitúa alrededor de 2. Además, su demanda energética resulta muy predecible en el tiempo. Por todo ello

la industria electrointensiva contribuye al aplanamiento de la curva de demanda y a la mejora del funcionamiento global del sistema. [9]

2.3.1. Gestión de la demanda

La gestión de la demanda se define como la planificación e implementación de distintas medidas destinadas a influir en el modo de consumir energía de manera que se produzcan los cambios deseados en la curva de la demanda.

Red Eléctrica es el operador del sistema y es por tanto el ente responsable de que exista equilibrio y de la óptima gestión de los flujos de energía para contribuir al aplanamiento de la curva de la demanda y a la estabilidad del sistema. Esta tarea, de la cual se encarga ininterrumpidamente durante todo el año, es realizada mediante la previsión de los consumos y generaciones, y el ajuste de variaciones o contingencias.

Las posibles actuaciones para la mejora de la curva de la demanda se clasifican en cuatro grandes grupos según su tipo de impacto en la misma: [10]

- Medidas de reducción del consumo de energía:
 - Mejora de la eficiencia energética.
 - Reducción de pérdidas de red y ahorro.
- Medidas de modulación de la carga (desplazamiento del consumo de horas punta a horas valle):
 - Discriminación horaria de precios.
 - Gestión activa de la demanda.
- Medidas de llenado de horas valle:
 - Almacenamiento: bombeo en embalses.
 - Conexión a red de vehículos eléctricos.
- Medidas de reducción de las puntas de consumo:
 - Servicio de interrumpibilidad.
 - Gestión automática de cargas.

La industria básica colabora con el sistema eléctrico ofreciendo el servicio de gestión de demanda a la operación del sistema. Como resultado, el sistema eléctrico es más seguro y económico, y las industrias participantes se ven compensadas económicamente con lo que mejoran su competitividad. Esta colaboración produce además una mejora de la eficiencia energética del sistema en su conjunto gracias a la modulación de la carga, lo que también disminuye la necesidad de nuevos puntos de generación e infraestructuras para transporte y distribución de la energía.

El servicio de gestión de la demanda industrial contribuye de forma importante a la integración de las renovables, minimizando eventuales vertidos de los excedentes de generación de éste tipo de tecnología gracias a la posibilidad de los clientes industriales de aumentar su consumo de energía en las horas valle.

Antes de la implementación de cualquier programa de gestión de carga en la industria es fundamental la identificación de las cargas que pueden ser gestionadas y en qué medida, ya que la efectividad de las medidas depende del grado en el que sea posible incrementar, disminuir y reprogramar los consumos.

Otra herramienta del servicio de gestión de la demanda que resulta de utilidad para el mantenimiento de la seguridad del sistema es el servicio de interrumpibilidad. Consiste en la reducción obligatoria del consumo a petición del Operador de Sistema hasta un umbral requerido, para dar así una respuesta rápida a las necesidades del sistema eléctrico en situaciones de emergencia, como falta de capacidad de generación o problemas en las redes de transporte y distribución. Como contraprestación, los participantes industriales pueden obtener tarifas reducidas durante el año. Las condiciones del servicio se contratan en base al grado de flexibilidad. [11]

2.4. Indicadores relativos al ámbito energético

Los indicadores son parámetros de medición que integran más de una variable y que caracterizan un evento a través de formulaciones matemáticas sencillas, ampliando el significado de las variables que lo componen y permitiendo una fácil comprensión de las causas, comportamientos y resultados de una actividad.

El estudio de los indicadores permite evaluar la evolución de la actividad o fenómeno que representan con mayor o menor precisión, respecto a las metas propuestas. Hacen posible la identificación de las causas de éxito o fracaso de la actividad representada mediante el análisis de series históricas del indicador, y facilitan la comparación con situaciones internacionales cuyas referencias sean equiparables y se basen en definiciones comunes, para la determinación de nuevos propósitos y objetivos. [12]

En lo relativo al ámbito energético, los indicadores se pueden clasificar según tres dimensiones principales:

- La dimensión **social** refleja la necesidad de las personas de tener acceso a los servicios energéticos básicos y cuáles son los parámetros de bienestar social que se encuentran relacionados con el uso de la energía.
- La dimensión **económico-energética**, es la más importante para un estudio de eficiencia energética ya que puede ilustrar la evolución de ésta desde ámbitos generales o sectoriales, cuantificando el consumo de energía respecto a una determinada actividad o parámetro físico. En este grupo de indicadores también se hace referencia a la estructura del sector energético o nivel de suficiencia y fiabilidad del mismo.
- La dimensión **ambiental** ilustra la necesidad de proteger el medio ambiente dado que la actividad industrial y su consumo de energía son factores que repercuten en la salud y el entorno. La contaminación de la atmósfera o del agua y la degradación de la tierra son algunas de las consecuencias negativas derivadas del uso de la energía, para cuyo control se han establecido acuerdos y normativas internacionales. Para el seguimiento de la evolución de estos fenómenos y del grado de cumplimiento de estos acuerdos, se analizan los indicadores ambientales.

A continuación se describen, dentro de cada dimensión, algunos de los indicadores más significativos para el estudio de las realidades energéticas y de eficiencia cuyo conocimiento será de utilidad dentro del ámbito de estudio del presente TFG.

Indicadores sociales

Indicadores socio-económicos

Composición sectorial del PIB

Consiste en el porcentaje de participación de cada uno de los sectores más representativos de la economía de un país en su PIB total. Algunos sectores típicamente considerados son el industrial, servicios o agrícola.

Interpretación: revela el peso de cada uno de los sectores económicos en la producción total del país.

Ejemplo: la composición por sectores del PIB español en el año 2010 fue de un 71,7% para el sector servicios, un 13,71% para el sector industrial, un 8,43% para el sector de la construcción, un 3,48% para la agricultura y un 2,77% para ramas energéticas. [13]

PIB per cápita

Se define como la relación entre el valor del Producto Interior Bruto (PIB) respecto a la población total del país.

Interpretación: es utilizado como una medida del bienestar material o desarrollo económico de un país o región, ya que muestra la producción de bienes y servicios por unidad de población. También puede ser interpretado como la contribución individual de cada habitante al desarrollo económico. [12]

Ejemplo: el PIB per cápita español para el tercer trimestre de 2013 se situó en 5600€. [14]

Valor Añadido Bruto

Es el saldo de la cuenta de producción, es decir, la diferencia entre la producción de bienes y servicios y el consumo intermedio para generarlos.

Interpretación: el Valor Añadido Bruto (VAB) representa el valor económico generado por una unidad productiva. Está referido en cada caso al tipo de rama de actividad o de sector para el que se elabore la cuenta de producción. [15]

Valor Añadido Bruto Industrial

Se define como la producción neta del sector industrial resultante de la diferencia entre el valor de la producción de este sector y los insumos intermedios.

Interpretación: la interpretación es la misma que la del Valor Añadido Bruto.

Ejemplo: el valor añadido del sector industrial (VABI) respecto al PIB en España en el año 2010 fue del 26% mientras que el valor de este indicador en China en ese mismo año fue del 47%. [16]

Índice de Producción Industrial (IPI)

Es el indicador para la medida de la producción conjunta de las distintas ramas del sector industrial. Se calcula mensualmente en base a un año de referencia.

Interpretación: representa la evolución de la producción del sector industrial.

Ejemplo: el IPI registrado en España en el sector industrial de “otros productos cerámicos” (26.25 según la clasificación CNAE) en 2013 ha caído un 44,7% respecto a los registros de 2012, hecho que guarda una estrecha relación con el declive del sector constructivo y la consiguiente disminución de la fabricación de ladrillo. [17]

Indicadores socio-energéticos

Consumo energético per cápita

Resulta de la división del consumo energético total del país entre su población.

Interpretación: es empleado habitualmente como un medidor del progreso económico, grado de industrialización y calidad de vida de los habitantes de un país.

Ejemplo: en 2011 los registros de consumo energético per cápita en España y Qatar fueron de 2.719 y 17.419 kilogramos equivalentes de petróleo respectivamente. De ello se puede extraer que países con grandes reservas de fuentes de energía realizan un uso de la misma mucho más extremo y desmedido que los países importadores. [18]

Consumo eléctrico per cápita

Es la división del consumo de energía eléctrica total del país entre su población.

Interpretación: ilustra los mismos parámetros que el anterior indicador.

Ejemplo: el consumo de electricidad per cápita en 2011 en España fue de 5598 kWh/habitante, mientras que los valores en Ghana y en Noruega para ese mismo año se situaron respectivamente en 344 y 23.174 kWh/habitante, quedando patente la diferencia de calidad de vida y grado de industrialización entre unos países y otros. [19]

Indicadores económico-energéticos

Cuando se pretende hacer una evaluación eficiencia energética, ésta no se toma como la relación entre energía útil y energía suministrada, tal y como indicaría su definición física empleada para medir el desempeño en un contexto técnico. Esta definición resulta útil para ilustrar rendimiento de un proceso, pero para la medida de la eficiencia a nivel macroscópico se utilizan indicadores que relacionan el consumo de energía con factores físicos o de la actividad económica.

Los indicadores más importantes para la medida de la eficiencia energética son la intensidad energética y los consumos específicos. Ambos pueden estar referidos tanto a nivel global como sectorial.

La principal fuente de información sobre indicadores energéticos y estadísticas de consumos de energía es la plataforma ODYSSEE. La plataforma es un proyecto de la Comisión Europea sobre indicadores de eficiencia energética, accesible a través del sistema de información Enerdata, donde se recoge gran cantidad de información sobre indicadores y su evolución.

El proyecto reúne a representantes de las agencias de energía de los 28 estados miembros de la UE e incluye indicadores detallados de cada sector y país desde 1990. Para paliar posibles desajustes entre países, los indicadores están ajustados de forma que tienen en cuenta las diferencias que puedan existir entre ellos por factores como el clima, la estructura económica, la situación geográfica o el grado de desarrollo. [20]

Intensidad energética

La intensidad energética es el indicador más utilizado para la medida de la eficiencia energética a gran escala. Se define como el consumo de energía primaria o final por unidad de Producto Interior Bruto.

Como se desprende de su definición, la intensidad energética es el valor medio de la cantidad de energía necesaria para generar una unidad de riqueza. Una disminución de este indicador conlleva un consumo medio menor de energía para generar cada unidad de riqueza, lo que se puede interpretar como un incremento en la eficiencia energética global del sistema analizado. [21]

La intensidad energética facilita por tanto información de gran utilidad sobre la eficiencia en el uso de la energía por parte de una economía. Por ello, tanto su estudio como el de los factores que la determinan resulta fundamental para poder evaluar los motivos de comportamientos pasados y poder diseñar políticas futuras que conduzcan a la reducción la intensidad energética para la consecución de los objetivos de ahorro energético, impacto ambiental o dependencia energética.

La fiabilidad de este indicador como reflejo del estado de la eficiencia no es absoluta ya que, por ejemplo, una disminución de la intensidad no implica que se haya producido necesariamente un avance en materia de eficiencia energética, dado que al depender tanto del PIB como del consumo de energía, este último puede haberse reducido en una economía a un ritmo mayor que PIB debido a una situación de recesión económica y ocasionar (como sucede en el caso de España en los últimos años) que el cociente tenga un valor inferior, arrojando un mejor resultado de intensidad energética.

Para hacer más comparables las intensidades energéticas entre países, éstas son convertidas y ajustadas a paridades de poder adquisitivo de forma que respondan a una misma estructura de referencia y se basen en definiciones comunes.

Ejemplo: la intensidad energética final española, en kilogramos equivalentes de petróleo por unidad monetaria (€ año 2000), ha disminuido de 0,132 a 0,111 entre los años 2005 y 2012. [22]

Intensidad energética por sectores económicos

Relaciona el consumo de energía que se produce en un determinado sector de la economía con la aportación de dicho sector al Producto Interior Bruto total.

Interpretación: permite determinar qué sectores económicos son más energéticamente intensos.

Ejemplo: la intensidad energética final para el sector industrial en España ha disminuido en el periodo 2005-2012 de 0,152 a 0,12 tep/00€. [22]

Consumo específico de energía

El consumo específico de energía se define como la energía consumida por cada unidad de una determinada actividad o bien material producido, expresados en unidades físicas (toneladas de acero, kilómetros recorridos, m² construidos...).

Interpretación: da una idea de la eficiencia con la que se realiza la actividad o proceso a la que se refiere. Si el consumo específico de un proceso disminuye, quiere decir que la eficiencia del mismo está mejorando, y viceversa. Posibilita la comparación respecto a índices internacionales para los mismos sectores industriales, lo que puede ser de utilidad para el desarrollo de programas de optimización energética en los procesos de un determinado sector.

Antes de hacer comparaciones es importante tener presente que el consumo específico se asocia a más los procesos de producción que al producto, ya que no es equiparable la comparación, por ejemplo, de la eficiencia en la producción de acero a partir de chatarra con la correspondiente a la producción a partir de mineral de hierro.

Dependencia del sistema energético de las importaciones de energía

Se calcula como la proporción entre el volumen de importaciones netas de energía y el consumo energético total interno, expresado en porcentaje.

Interpretación: el indicador de dependencia energética se utiliza para la determinación del peso que tienen las importaciones de energía en el abastecimiento energético del país. Ilustra el grado de vulnerabilidad de un sistema energético respecto a variaciones de factores externos al mismo.

Ejemplo: Noruega, como uno de los principales exportadores de petróleo mundiales, presenta en el año 2012 una tasa de importación de energía sobre su consumo energético total del -557%. En cambio, en España el alto grado de dependencia energética eleva este registro al 73% para el mismo año. [23]

Participación en el consumo de energía por sector

Se define como la aportación porcentual de cada sector de consumo final de la economía al consumo energético total del sistema.

Interpretación: permite planificar y controlar los consumos sectoriales de cara al futuro ya que muestra el grado de participación de cada uno de los sectores en el consumo energético total.

Ejemplo: la participación del sector industrial en España en el consumo energético final total ha pasado de un 34,5% en el año 1990 a un 30,2% en 2010. [24]

Indicadores ambientales

Participación de los recursos renovables en la oferta energética total

Representa la oferta de energía primaria renovable respecto a la oferta total de energía.

Interpretación: mide el grado de penetración de los recursos renovables en la matriz energética del sistema. Puede servir para evaluar la mitigación del impacto ambiental producido por concepto de generación de energía. También es un indicador de la tendencia de un país a reducir su dependencia energética del exterior.

Ejemplo: España duplicó la participación de energías renovables en el abastecimiento de energía final entre los años 2004 a 2010, llegando al 11,3%. [25]

Emisiones de CO₂ per-cápita

Es el cociente entre la cantidad total de emisiones de dióxido de carbono producidas y el número de habitantes. Se expresa en toneladas métricas per cápita.

Interpretación: da una magnitud del grado de contaminación del medio del que es responsable cada habitante, y permite realizar previsiones de incremento del impacto ambiental en función del crecimiento demográfico del país.

Ejemplo: el orden de magnitud de emisiones de CO₂ per cápita de países intensamente contaminantes como Qatar o Estados Unidos es respectivamente de 40,3 y 17,6 toneladas métricas por habitante en el año 2010. Este indicador en países más comedidos en materia ambiental, como Francia o España se sitúa en torno a 5,7. [26]

Intensidad de emisiones CO₂ respecto al PIB

Es la división de la cantidad total de emisiones de dióxido de carbono entre el PIB del país.

Interpretación: permite analizar el impacto ambiental producido por un país para la creación de riqueza. Su reducción pasa por la puesta en marcha programas de desarrollo sostenible que fomenten la desvinculación del crecimiento de la economía del incremento de la contaminación. Presenta valores elevados en regiones escasamente desarrolladas tecnológica y económicamente.

Ejemplo: Un alto valor de este indicador se da en países que combinan intensas emisiones con un valor reducido del PIB, como Ucrania o Iraq con índices hasta 5 veces superiores a España. [27]

2.5. Otros conceptos de importancia

Tonelada Equivalente de Petróleo

La tonelada equivalente de petróleo (TOE ó TEP) es una unidad energética equivalente a la cantidad de energía liberada por la combustión de una tonelada de petróleo. Esta unidad es usada para representar la energía producida o consumida a nivel macroscópico. Una Tep equivale a una energía de 11630 kWh.

Ahorro energético

El concepto de ahorro energético relativo a un estudio de eficiencia no se refiere al ahorro producido como resultado de una reducción de los hábitos o el nivel de consumo, sino al que se da producto de un funcionamiento energéticamente eficiente lo que se traduce, por supuesto, en ahorro económico.

Para cuantificar la energía ahorrada en una determinada actividad o proceso de una forma sencilla e intuitiva, existe una unidad denominada "Negajulio" [28]. El término fue acuñado por el físico americano Amory B.Lovins, y resulta de utilidad para ilustrar la energía que deja de tener que ser generada gracias a la mejora de la eficiencia energética.

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad."

Albert Einstein [29]

Desarrollo sostenible

De acuerdo al informe Brundtland de las Naciones Unidas [30], el desarrollo sostenible consiste en "satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades".

Seguridad de suministro

La seguridad de suministro se puede definir como la capacidad de los sistemas energéticos de ofrecer a los consumidores finales un flujo de energía con un nivel determinado de continuidad y calidad de una forma sostenible, y a precios asequibles, condicionado por las variables de dependencia y vulnerabilidad ante fuentes de suministro del exterior. [31]

Mejor técnica disponible (MTD)

En la Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación se definen las "mejores técnicas disponibles" como:

"la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente."

La directiva también define el significado de cada uno de los términos de la siguiente manera:

- Mejores: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.
- Técnicas: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada.
- Disponibles: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios. [32]

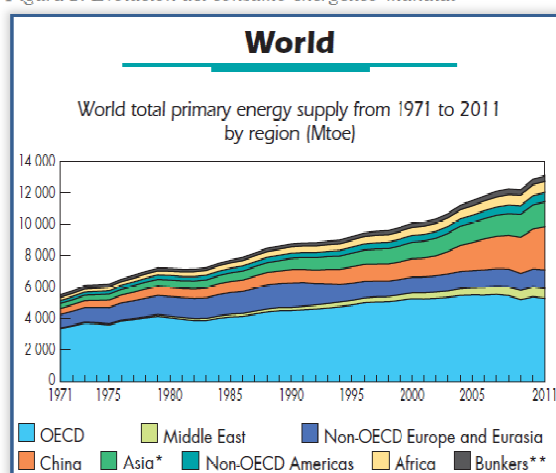
Capítulo 3. Contexto energético y de eficiencia actual

3.1. Contexto energético internacional

El modelo energético mundial ha sufrido un drástico proceso de transformación en los últimos tiempos, especialmente en los últimos 50 o 60 años, en los cuales un avance espectacular en la productividad y una evolución tecnológica sin precedentes han permitido un enorme ritmo de desarrollo y un aumento del nivel de vida de las personas.

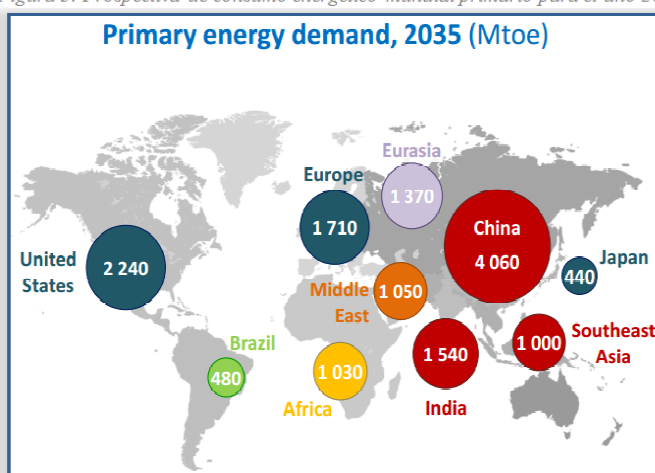
El mundo consume hoy más del doble de energía de la que consumía cuatro décadas atrás, producto del exponencial aumento de la población mundial y del ya mencionado desarrollo global, con las implicaciones de requerimientos energéticos que esto supone. Los pronósticos respecto al consumo energético mundial en el futuro próximo hacen presagiar un incremento de las necesidades energéticas de un 40% para el año 2035 en base a la actual tasa de aumento anual del 1,8% [1], debida principalmente a la incorporación de países emergentes como China, India o Brasil a llamada economía del bienestar.

Figura 2: Evolución del consumo energético mundial



Fuente: IEA, Key World Energy Statistics 2013

Figura 3: Prospectiva de consumo energético mundial primario para el año 2035



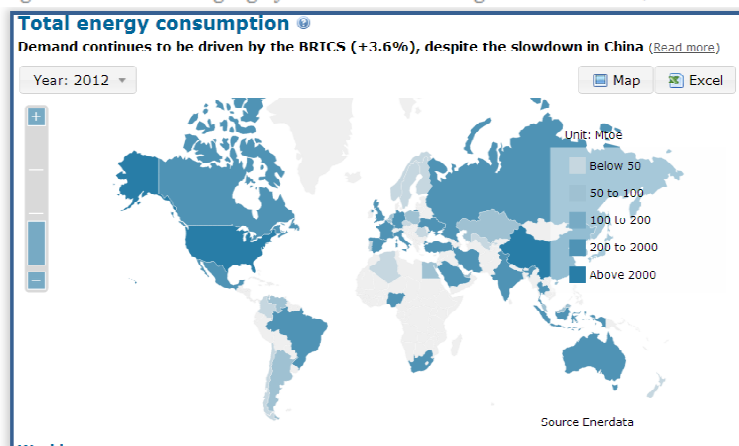
Fuente: IEA, World Energy Outlook 2013 Launch

Estas tendencias no sólo ponen al límite el modelo energético actual, sino que conllevan dramáticas consecuencias ambientales como la contaminación del medio o el calentamiento global producto de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto conlleva nefastas repercusiones a corto plazo en forma de catástrofes meteorológicas o aumento del nivel del mar.

En lo relativo a la distribución geográfica de los consumos energéticos en el planeta, cabe destacar el auténtico vacío energético presente en el continente Africano y parte de Sudamérica con respecto al resto del mundo (figura 4). Al mismo tiempo, China, Estados Unidos y la Unión Europea se sitúan en el extremo opuesto, habiéndose convertido en los últimos años el gigante asiático en el mayor consumidor mundial de energía (figura %).

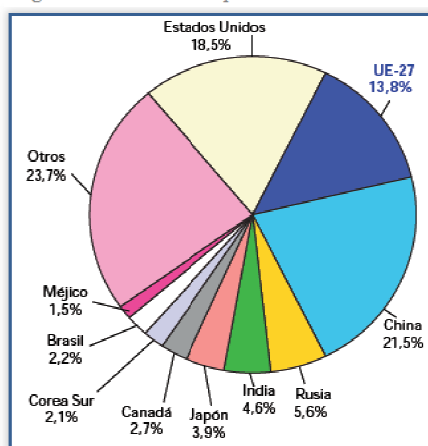
Dada la vinculación de las emisiones de CO₂ con el consumo energético, son estas últimas regiones las responsables de la mayor parte de las emisiones totales en el planeta.

Figura 4: Distribución geográfica del consumo energético en el mundo, año 2012



Fuente: Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2013

Figura 5: Peso de cada país en el consumo mundial



Fuente: MINETUR, "La Energía en España 2011"/BP

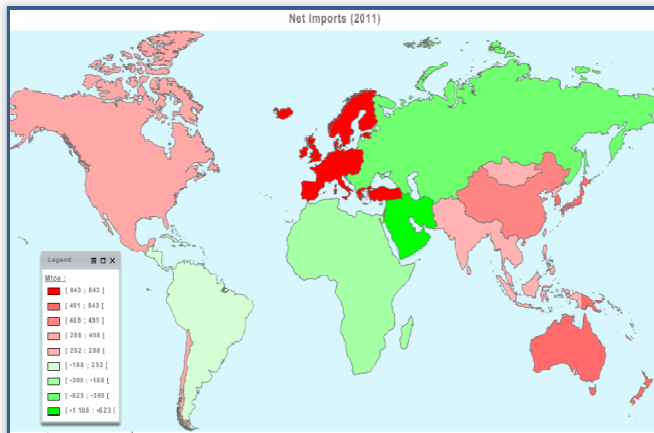
Cuando se habla del modelo energético global, inevitablemente ha de hablarse de un modelo basado en los combustibles fósiles y en la dependencia energética por parte de los países importadores de estos combustibles.

Las fuentes de energía fósil son los principales vectores del desarrollo y resultan por este motivo los mayores protagonistas del paradigma energético mundial. Se han convertido en recursos estratégicos de máxima importancia para los intereses de poder económico y político, dado el desajuste geográfico entre sus focos de producción y consumo, es decir entre los países productores y los países importadores.

Esta dependencia confiere al modelo energético actual una condición de gran fragilidad e inestabilidad geopolítica que tiene como resultado la volatilidad de los precios y la incertidumbre respecto a la garantía de suministro. Esta condición quedó claramente manifiesta durante las crisis del petróleo de los años 1973 y 1979 en las que se demostró la enorme dependencia de este combustible por parte de todo el sistema económico y social del planeta.

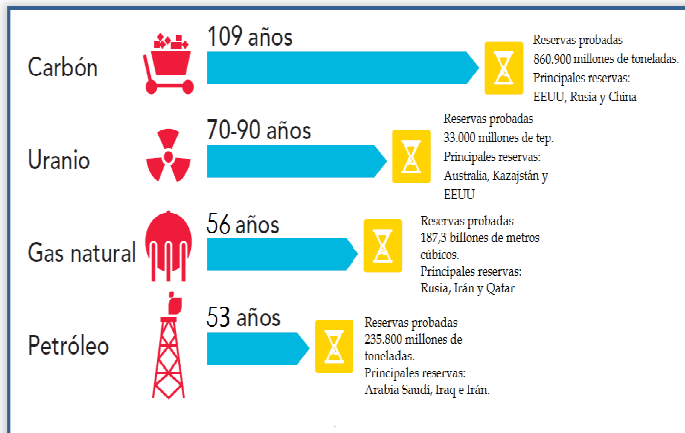
Al problema de la dependencia energética hay que añadir el progresivo agotamiento de las fuentes de energía no renovable, cuyo horizonte de explotación al ritmo actual de consumo es incierto, pero en ningún caso parece superior a los 200 años.

Figura 6: Dependencia energética mundial por regiones



Fuente: IEA, Statistics, Energy Indicators

Figura 7: Horizonte de agotamiento de fuentes de energía no renovable

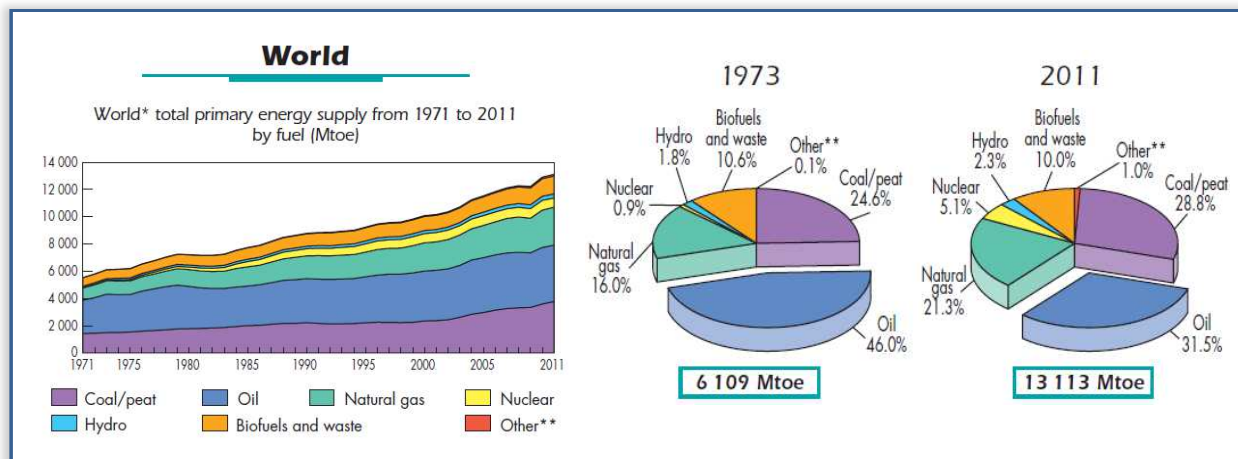


Fuente: IDAE, "Guía práctica de la energía", figura editada según datos de "BP Statistical Review of World Energy" Junio 2013

Las tendencias en el consumo de combustibles fósiles a largo de los últimos 40 años muestran una paulatina reducción de la participación del petróleo en el mix energético primario mundial, al mismo tiempo que gas natural y el carbón han aumentado su protagonismo en el cómputo total (figura 8).

Resulta especialmente llamativo el reciente resurgimiento del carbón el cual, en los últimos años, ha recuperado y superado cuotas de utilización correspondientes al último tercio del siglo pasado. Los argumentos que respaldan este resurgimiento son su reducido precio, su gran disponibilidad y el hecho de que sea el combustible fósil del que se conocen más reservas.

Figura 8: Evolución mundial de los requerimientos de fuentes primarias de energía



Fuente: IEA, Key World Energy Statistics 2013

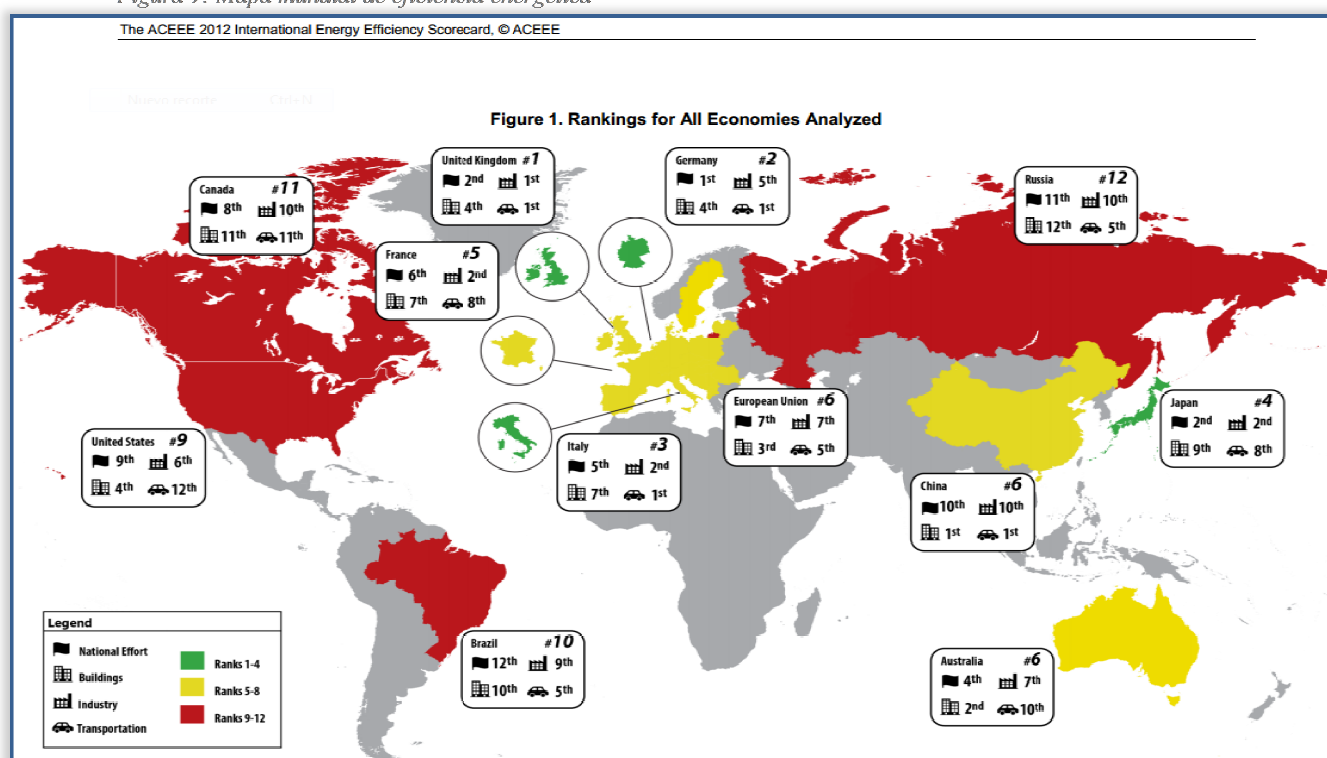
El impacto sobre el medio ambiente producto de la explotación de este modelo energético unido al lastre político-económico que supone la situación de dependencia energética, constituyen actualmente unas de las mayores preocupaciones políticas y focos de conflicto en el planeta.

Esta dinámica hace evidente que el actual modelo energético resulta insostenible en términos ambientales, energéticos y sociales; por lo que los tres grandes retos que dominan y van a dominar la agenda política del siglo XXI de cara a la sostenibilidad del mencionado modelo son: el refuerzo de la seguridad de suministro, la salvaguarda del desarrollo sostenible y el mantenimiento la competitividad productiva al mismo tiempo.

La eficiencia energética representa, en este convulso panorama, una herramienta crucial de la que hace tiempo que son conscientes los gobiernos para abordar con éxito los tres grandes desafíos energéticos mundiales antes mencionados. Con el objetivo de ilustrar el grado de implicación mundial en términos de eficiencia energética, el “Consejo Americano para una Economía Eficiente en Energía” (ACEEE) ha publicado un estudio que evalúa la eficiencia energética en 12 de las mayores economías del mundo a través de más de 25 indicadores. [2]

El informe sectoriza la eficiencia diferenciando entre: edificios (sector residencial), industria, transporte y esfuerzo nacional. La síntesis de los resultados del informe se plasma el siguiente mapa, que indica la situación comparativa de eficiencia de cada sector en cada uno de los países, así como la posición relativa de cada país en base a su valoración global de eficiencia: correspondiendo los colores verde, amarillo y rojo a las regiones altamente eficientes, intermedias, y poco eficientes respectivamente.

Figura 9: Mapa mundial de eficiencia energética



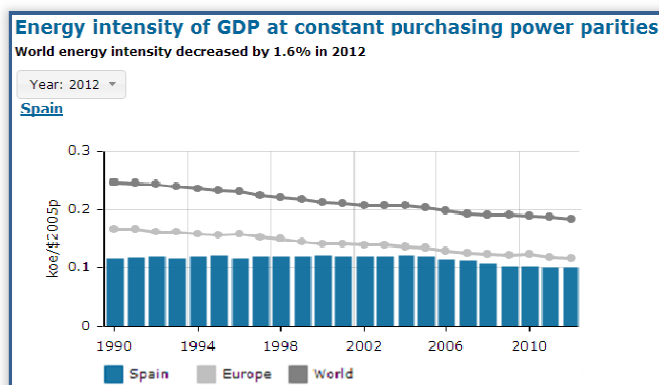
Fuente: The ACEEE International Energy Efficiency Scorecard

Las economías estudiadas representan más del 78% del producto interno bruto mundial, el 63% del consumo mundial de energía y el 62% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono.

Los resultados muestran que la clasificación de los países en términos globales, del más al menos eficiente, es la siguiente: Reino Unido, Alemania, Italia, Japón, Francia, la Unión Europea, Australia, China, EE.UU., Brasil, Canadá y Rusia.

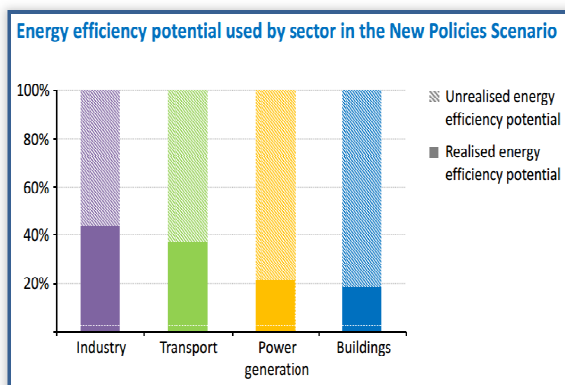
Cabe destacar que los países que ocupan las tres primeras posiciones en la valoración global de eficiencia energética son países pertenecientes a la Unión Europea, lo que pone de manifiesto la intensa política al respecto que se está llevando a cabo. En el ámbito de la eficiencia energética en la industria, sobresalen el Reino Unido, Japón, Francia e Italia; a la vez que el esfuerzo nacional es liderado por Alemania, Japón y Reino Unido.

Figura 10: Evolución global de la intensidad energética, periodo 1990-2012



Fuente: Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2013

Figura 11: Explotación del potencial de la eficiencia energética, horizonte 2035



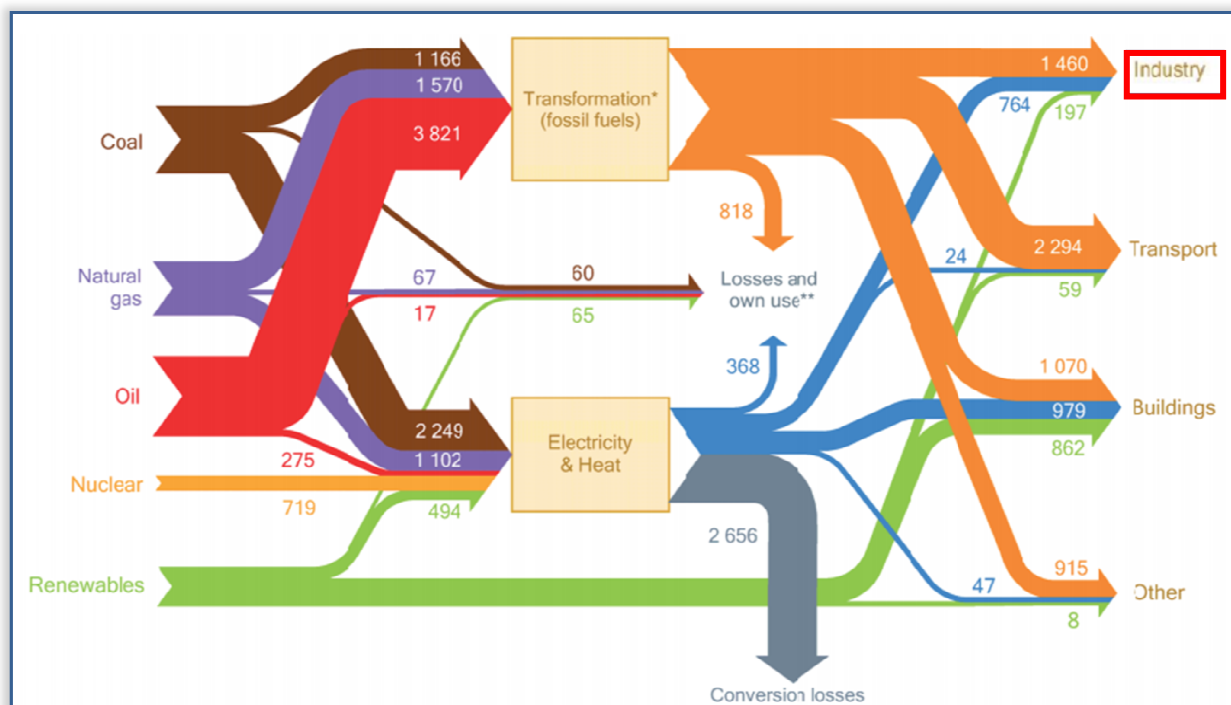
Fuente: World Energy Outlook 2012, Energy Indicators Workshop

La intensidad energética en el mundo está disminuyendo en las últimas décadas (figura10) pero, pese a las medidas y planes de eficiencia emprendidos, la “Agencia Internacional de la Energía” afirma que los esfuerzos son insuficientes ya que, suponiendo el cumplimiento de los objetivos estipulados en cada una de las políticas proyectadas para el horizonte del año 2035, éstas sólo supondrían en torno a una quinta parte de la explotación del potencial de ahorro disponible en los sectores residencial y de generación de potencia, y aproximadamente un 40% del disponible en los sectores transporte e industria (figura11). [3]

3.1.1. El sector industrial en el contexto internacional

La industria es la base en la que se asientan los modelos económico y social mundiales, y constituye el principal motor para el desarrollo en el planeta. Es responsable de cerca de un 30% del consumo energético mundial, y en base a las tendencias actuales, la “U.S Energy Information Administration” (EIA) en su “International Energy Outlook 2013” le asigna más de un 50% de mismo para el año 2040 [4]. La proporción y composición del consumo correspondiente a la industria en el mundo se puede observar en el esquema de la figura 12, en el cual se muestra la magnitud y distribución de los distintos flujos de energía primaria y final que componen la estructura del modelo energético mundial, en función de los sectores de consumo a los que va destinada:

Figura 12: Sistema energético global



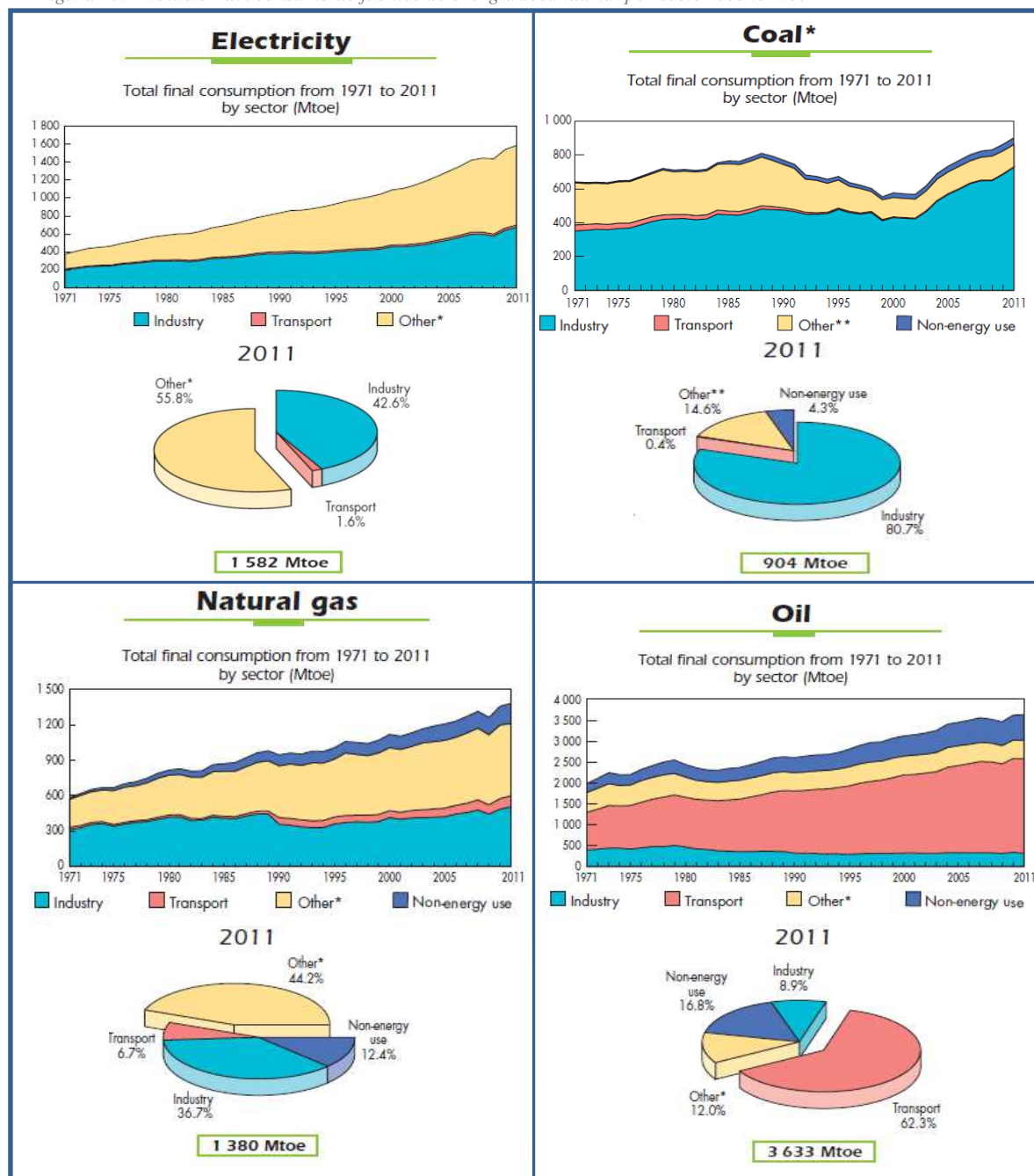
Fuente: IEA, Key World Energy Statistics 2013

En la actualidad, la distribución geográfica de la industria en el planeta se encuadra en un marco de deslocalización, fenómeno producido a gran escala a partir de los años 90, consistente en el traslado de las plantas de producción a países con un menor grado de desarrollo debido a su abundancia en materias primas, fuentes de energía, y mano de obra barata, así como legislaciones flexibles en materia ambiental y laboral. Esto ha producido la concentración de enormes focos industriales en determinadas regiones del planeta como India o China, más allá de las históricas Europa, Estados Unidos o Japón.

En cuanto a la utilización de las distintas fuentes de energía secundaria a nivel mundial, la participación del sector industrial en su consumo corresponde en la

actualidad a entorno al 42% de la energía eléctrica, el 80% del carbón, el 37% del gas natural y un modesto 9% del total de petróleo:

Figura 13: Evolución del consumo de fuentes de energía secundaria por sector económico



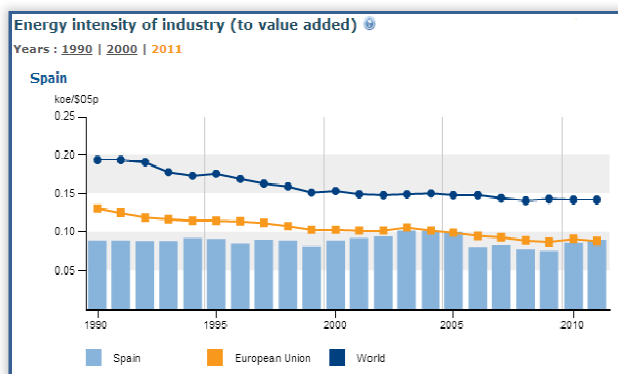
Fuente: IEA, Key World Energy Statistics 2013

De estas estadísticas es destacable, el drástico ascenso del uso del carbón en el cómputo global a partir del año 2000 ya señalado en el apartado previo, que es atribuible a su masiva utilización por parte de la industria China como principal fuente de energía. Es también reseñable la progresiva disminución del papel del petróleo en el total de requerimientos energéticos industriales.

En términos de impacto ambiental, la industria constituye una de las actividades con mayor responsabilidad tanto en el proceso productivo como por los residuos generados, de la producción de fenómenos como la lluvia ácida, el deterioro de la capa de ozono o la intensificación del efecto invernadero por emisiones de CO₂. La magnitud con la que se producen estos fenómenos ambientales dependerá de los consumos energéticos de la industria, pudiendo ser mitigados en gran medida o incluso revertidos a través de mejoras de la eficiencia energética industrial.

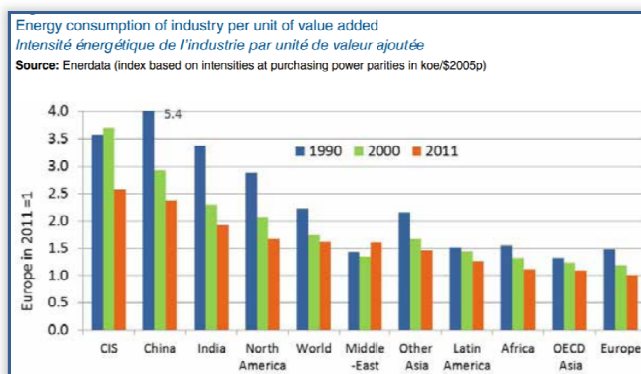
Desde 1990, la tendencia mundial en materia de intensidad energética en la industria, al igual que la intensidad global, avanza hacia valores más reducidos, con resultados comparativos muy favorables para España y Europa. Sin embargo, desde el año 2000, debido a la crisis global, el ritmo de avance de esta tendencia se ha visto algo disminuido en la mayor parte de regiones del mundo (figura 14). [5]

Figura 14: Tendencia mundial de la intensidad energética en la industria



Fuente: World Energy Council, Indicators, Industry.

Figura 15: Valores relativos de intensidad energética en la industria por regiones



Fuente: World Energy Council, "World Energy Perspective", 2013

Pese a la tendencia de reducción global, aún existen grandes diferencias entre la eficiencia industrial en unas regiones y otras. En la figura 15 se puede observar cómo las intensidades en la industria en las últimas dos décadas tienden a disminuir en todas las regiones, excepto en Oriente Medio. Disminución global de la intensidad energética cuya proyección se ha mitigado en la última década. Se aprecia asimismo un marcado contraste entre la intensidad industrial en regiones como China, los países pertenecientes a la antigua URSS (CIS) o la India con respecto a Europa, con unos valores en torno a 2 ó 2,5 veces superiores.

3.1.2. Iniciativas y tratados internacionales relativos al ahorro y eficiencia energética

Las iniciativas y tratados que tienen la suficiente repercusión para agrupar los intereses internacionales a fin de sentar acuerdos comunes, tienen que ver con temas generales de gran trascendencia como pueden ser ambientales, humanitarios, de seguridad nuclear o de desarrollo sostenible.

En materia ambiental, los primeros antecedentes de la política actual se sitúan en el año 1972, cuando el Club de Roma realiza su primer informe “Los Límites del Crecimiento”, cuya publicación produjo una gran repercusión a nivel internacional en el ámbito político, económico y científico.

El informe demostró la contradicción que suponía el consumo ilimitado y descontrolado de bienes materiales en un mundo con recursos finitos, consiguiendo la inclusión de este asunto en los principales debates mundiales. Por ello es considerado como el origen del pensamiento ambiental globalizado y como el punto de partida para las siguientes declaraciones y acuerdos en la materia. [6]

En este marco de creciente concienciación ambiental, se produce en el mismo año 1972 la “Declaración de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano”, aprobada en Estocolmo con la presencia de 113 países, en la que se plasma la preocupación al respecto.

Estos y otros hechos similares, son la base para que en 1997 se estableciese el protocolo de Kioto, por el cual los países industrializados y economías de transición se comprometieron a la reducción de los 6 gases de efecto invernadero en un 5,2% para el periodo 2008-2012 tomando como base los niveles de 1990. Entre los compromisos más relevantes de reducción de emisiones destacan: la Unión Europea -8%, Estados Unidos -7%, Japón -6%, Rusia 0%.

El protocolo hace referencia a la eficiencia energética en su artículo 2 como herramienta para la consecución de sus objetivos: [7]

“...1. Con el fin de promover el desarrollo sostenible, cada una de las Partes incluidas en el anexo I, al cumplir los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3:

*a) Aplicará y/o seguirá elaborando políticas y medidas de conformidad con sus circunstancias nacionales, por ejemplo las siguientes:
fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional...”*

Protocolo de Kioto 1997

NORMA ISO 50001

El referente internacional en normativa en el ámbito de la eficiencia y la gestión de la energía es la norma ISO 50001, publicada en junio de 2011. Esta norma especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía. [8]

El estándar, describe su alcance y objetivos de la siguiente forma:

“El propósito de esta norma es permitir a las organizaciones establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar el rendimiento energético, incluyendo la eficiencia energética, uso y consumo. La aplicación de esta norma tiene la finalidad de conducir a reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, el costo de la energía, y otros impactos ambientales relacionados, a través de la gestión sistemática de la energía. Esta Norma Internacional es aplicable a todos los tipos y tamaños de organizaciones, independientemente de las condiciones geográficas, culturales o sociales. La implementación exitosa depende del compromiso de todos los niveles y funciones de la organización, y en especial de la alta dirección”

Se estima que la amplia aplicabilidad de la norma ISO 50001 a través de los sectores distintos económicos podría influir hasta en un 60% del consumo de energía del mundo, según información proporcionada en el “International Energy Outlook 2010” de la “U.S. Energy Information Administration” (AIE). [8]

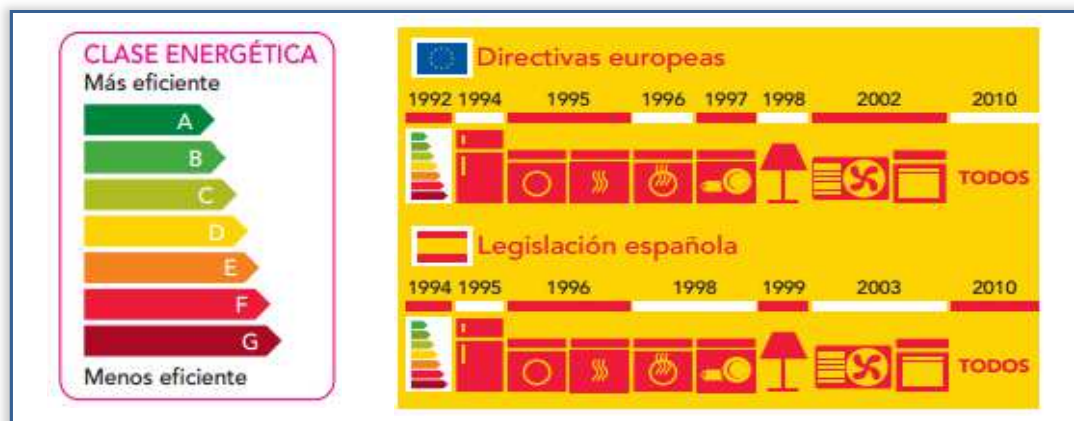
La Etiqueta Energética

Este sistema de clasificación energética según el nivel de eficiencia, es de obligado cumplimiento en la Unión Europea a partir de la entrada en vigor de la Directiva 92/75/CE de 1992. El sistema de etiquetado energético de productos está especialmente asentado en Europa aunque también existe en otras partes del mundo pese a no estar tan implantado y estandarizado.

La etiqueta energética constituye una herramienta informativa para los compradores de aparatos consumidores de electricidad, que les permite conocer de forma rápida la eficiencia energética del aparato en cuestión, de manera que se decante por la opción más eficiente. El sistema también persigue influir en los fabricantes para que eliminen del mercado los electrodomésticos más ineficientes.

Existen 7 clases de eficiencia, identificadas por un código de colores y letras que van desde el color verde y la letra A para los equipos más eficientes, hasta el color rojo y la letra G para los equipos menos eficientes. Los tipos de electrodomésticos que tienen obligación de etiquetarse energéticamente son frigoríficos, congeladores, lavadoras, lavavajillas, secadoras, fuentes de luz domésticas, hornos eléctricos y equipos de aire acondicionado. [9]

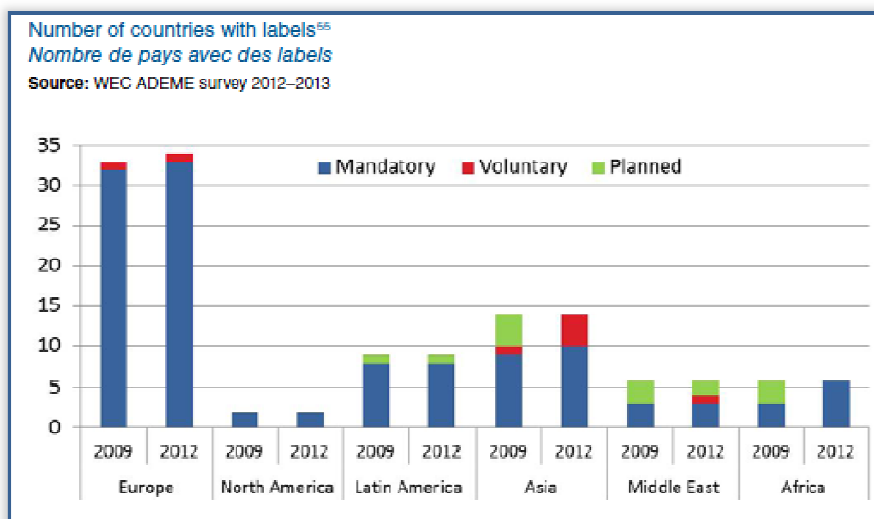
Figura 16: La etiqueta energética



Fuente: IDAE, “Guía Práctica de la Energía, Consumo eficiente y responsable”, Julio 2011

El uso de la etiqueta energética no solo se limita al ámbito de los electrodomésticos, sino que también se ha implantado el sistema de etiquetado de eficiencia de automóviles y la certificación energética de edificios.

Figura 17: Número de países en cada región mundial con sistemas de etiquetado energético



Fuente: World Energy Council, “World Energy Perspective” 2013

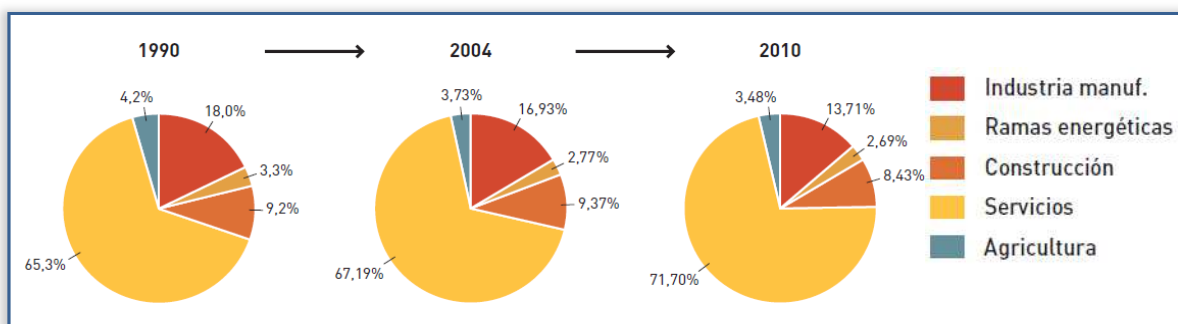
En la figura 13 se muestra el número de países en cada región del mundo que han desarrollado normas para la implantación de sistemas de etiquetado energético, así como el carácter obligatorio, voluntario o planificado de las mismas, donde se puede apreciar el liderazgo europeo en la materia.

3.2. Contexto energético español

Aspecto económico

La economía española se sustenta fundamentalmente en el sector servicios con más del 70% de la aportación sobre el PIB total, frente al 13% que corresponde aproximadamente al sector industria. La evolución reciente tiende a hacer aún más contrastada esta diferencia. El panorama económico y energético español reciente está fuertemente marcado por el impacto de la crisis financiera comenzada en el año 2008.

Figura 18: Evolución de la estructura sectorial del PIB

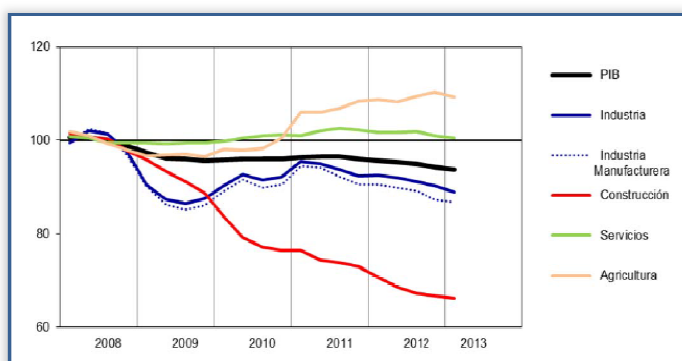


Fuente: IDAE, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020

El producto interior bruto descendió un 4% en el periodo 2008-2010, con una ligera recuperación de un 0,4% en 2011, para volver a sufrir una caída del 1,4% en 2012. De la mano de esta caída del PIB, se ha producido la reducción de la actividad del sector industrial, y muy especialmente del sector constructivo. [10]

Comparando esta situación con la de las principales economías del entorno europeo y mundial, se aprecia una evolución particularmente desfavorable en España, en especial en los últimos años con resultados hasta cuatro veces peores que la media de la Unión Europea en el ámbito del PIB, ampliándose de esta forma la brecha de crecimiento con respecto a los principales países Europeos.

Figura 19: Evolución del VAB en España por sectores



Fuente: MINETUR, Informe Anual 2012

Figura 20: Evolución del PIB por áreas y países (porcentajes de variación interanual)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
UE	3,2	0,3	-4,3	2,1	1,6	-0,3
Zona Euro	3,0	0,3	-4,3	1,9	1,5	-0,5
Alemania	3,4	0,8	-5,1	4,0	3,1	0,9
España	3,5	0,9	-3,7	-0,3	0,4	-1,4
Francia	2,2	-0,2	-3,1	1,6	2,0	0,0
Italia	1,5	-1,2	-5,5	1,7	0,5	-2,4
R. Unido	3,6	-1,0	-4,0	1,8	1,0	0,3
OCDE	2,8	0,2	-3,6	3,0	1,9	1,3
EEUU	1,9	-0,3	-3,1	2,4	1,8	2,2
Japón	2,2	-1,1	-5,5	4,7	-0,5	1,9

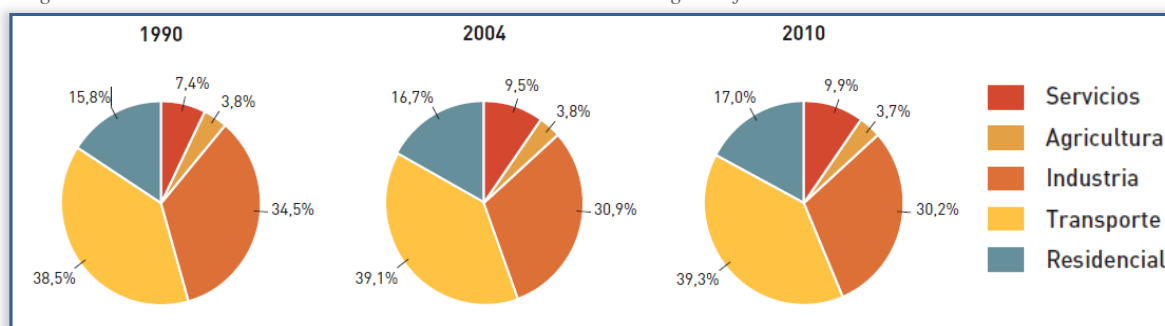
Fuente: MINETUR, Informe Anual 2012

Aspecto energético

En lo relativo al consumo energético final en el sistema español, el sector con mayor peso en el mismo es el transporte, con un 40% del total, seguido por los sectores industrial y residencial con tasas respectivas de un 30% y un 17% sobre el total (figura 21).

La evolución del consumo energético por sectores económicos en las últimas dos décadas refleja una tendencia al aumento de la proporción correspondiente a los sectores transporte, residencial y servicios, al mismo tiempo que una disminución del sector industrial, el cual ha descendido 4 puntos porcentuales con respecto a los años 90. Esto es atribuible tanto a la mejora de la eficiencia energética como a su pérdida de relevancia en la configuración sectorial.

Figura 21: Evolución de la estructura sectorial de la demanda energética final

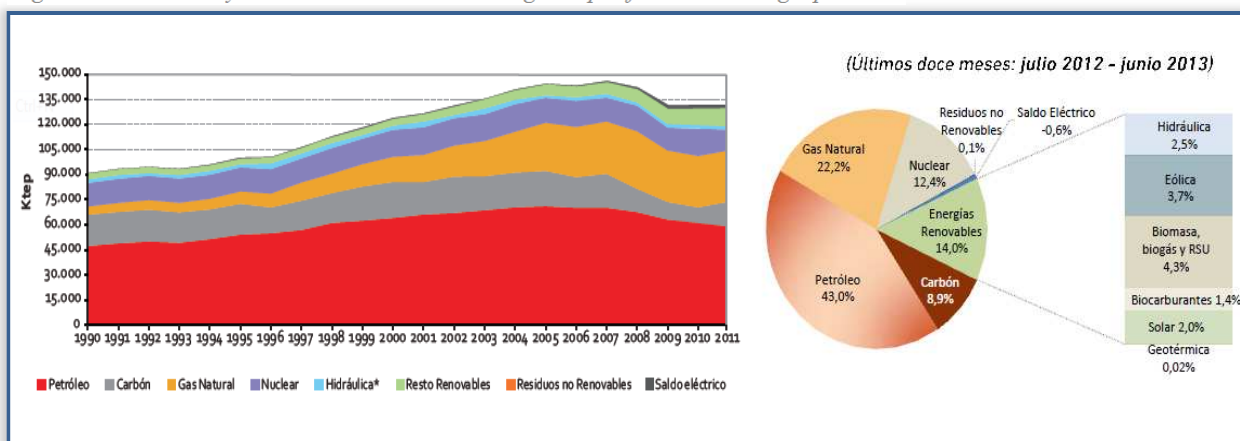


Fuente: IDAE, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020

La progresión del consumo de energía primaria en los últimos 20 años (figura 22) muestra una tendencia creciente continuada durante el periodo 1990-2007 pasando de unos 90 Mtep a unos 145. Crecimiento que se ve truncado con la llegada de la crisis, reduciéndose a 130 Mtep en el año 2011.

La estructura de consumos por fuentes primarias en el sistema energético español, está compuesta por un peso de cerca del 75% de combustibles fósiles, dentro de los cuales el petróleo es el principal protagonista con un 43%, seguido del gas natural (22%) y un pequeño porcentaje de cerca del 9% para el carbón.

Figura 22: Evolución y estructura del consumo energético por fuentes de energía primaria

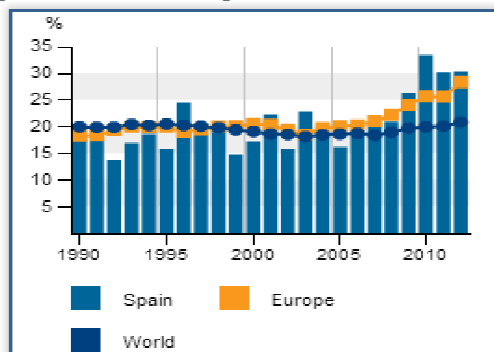


Fuente: IDAE/MINETUR

Las aportaciones del petróleo y el gas al mix energético primario siguen tendencias antagonistas dada la progresiva disminución del primero a partir de 2005, compensada a su vez por un aumento en el consumo de gas natural.

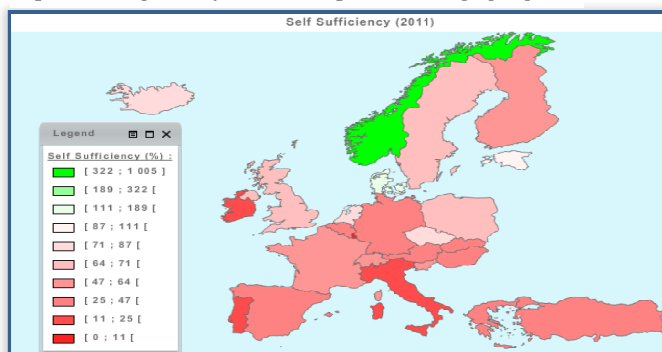
El cuarto restante de los requerimientos energéticos primarios totales se cubre con energía nuclear (12,4%) y energías renovables (14%). Estas últimas tienen una participación de entorno al 30% en la generación eléctrica total en España, cuota que es notablemente superior a la media mundial y europea a partir del año 2008, en el cual se produce una amplia penetración de las mismas en el mix energético primario español.

Figura 23 Evolución de la generación eléctrica renovable



Fuente: Enerdata, Energy Research, Spain

Figura 24: Mapa de suficiencia energética en Europa por países

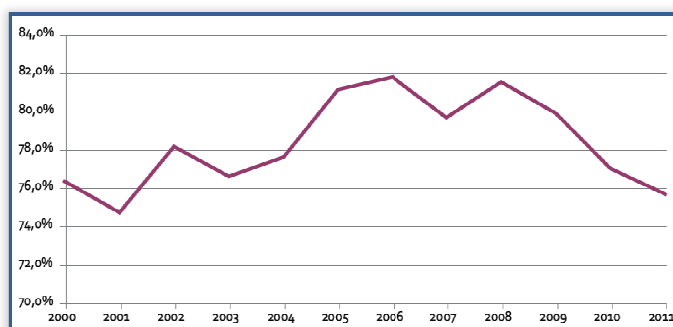


Fuente: IEA, Statistics, Energy Indicators

El gran peso de los recursos fósiles en el mix energético español y la ausencia de los mismos en su territorio, posicionan a España como un país altamente importador cuyo panorama, al igual que el de la mayoría países de la Unión Europea, está marcado por una seria situación de dependencia y vulnerabilidad energética.

El caso español resulta más grave ya que sus niveles de dependencia se sitúan en torno a un 75%, [11] muy por encima de la media de la Unión (54%), y sólo superados por países como Italia, Bélgica, Portugal o Irlanda. Los recursos fósiles de los que la UE es más dependiente son el petróleo, cuyas importaciones representan un 85% del total y el gas natural con un 67%. La evolución del grado de suficiencia energética en Europa no muestra indicios de mejora, ya que lejos de revertirse la situación, ésta se agudiza con el paso de los años tal como muestra la tabla de la figura 26. [12]

Figura 25: Evolución del grado de autoabastecimiento de España



Fuente: MINETUR, La Energía en España 2011

Figura 26: Evolución de la dependencia energética, UE-27

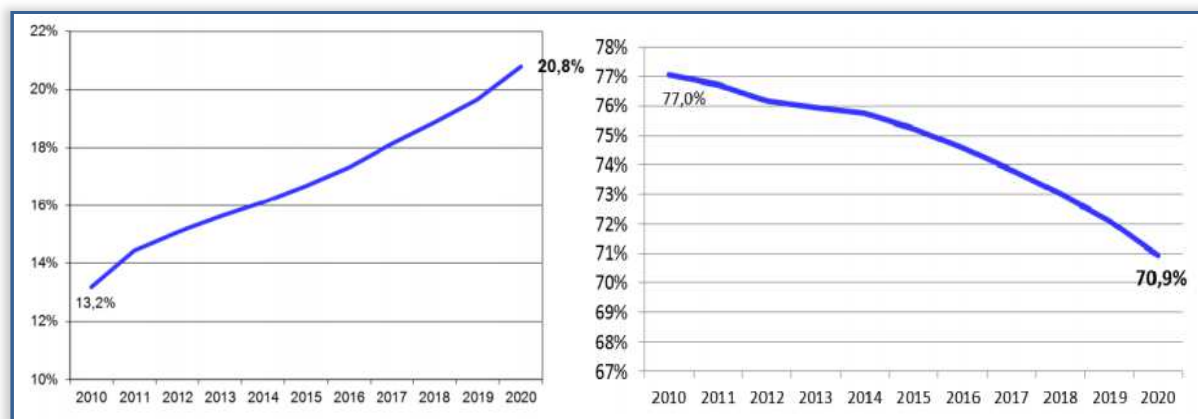
EU-27 Energy Import Dependency						
By Fuel						
Import Dependency (%)	1995	2000	2005	2009	2010	2011
Total	43.2%	46.7%	52.4%	53.8%	52.6%	53.8%
Solid Fuels	21.4%	30.5%	39.2%	41.1%	39.4%	41.4%
Petroleum and Products	74.3%	75.7%	82.2%	83.2%	84.1%	84.9%
Gas	43.5%	48.9%	57.7%	64.3%	62.4%	67.0%

Fuente: European Commission, EU Energy in figures, 2013

Pese a lo alarmante de los niveles de dependencia en España, éstos han tenido valores superiores a los actuales algunos años atrás, llegando a alcanzar un 82% en el año 2006, como se puede apreciar en la figura 25.

La tendencia a la disminución del grado de dependencia a partir del año 2008 tiene su explicación en el ya mencionado aumento de la participación de las energías renovables en la cobertura energética primaria. Las previsiones del Ministerio de Industria en éste ámbito, de cara al cumplimiento del compromiso del 20% de abastecimiento primario renovable recogido en el plan de Energías Renovables 2011-2020, sitúan la dependencia energética en España en el escenario de 2020 en un 70,9%, gracias al aumento del share primario renovable hasta una tasa del 20,8% (figura 27). [13]

Figura 27: Evoluciones de la aportación primaria renovable y del grado de dependencia energética en España



Fuente: MINETUR, "Planificación de los sectores de electricidad y gas 2012-2020", 2011

Al alto grado de dependencia española de los recursos fósiles hay que sumar, la posición geográfica periférica de la Península Ibérica respecto a Europa, que la convierte en una isla energética, limitando el nivel desarrollo de infraestructura para el abastecimiento energético y sobre todo la capacidad de interconexión eléctrica (con Francia) que en la actualidad se antoja insuficiente.

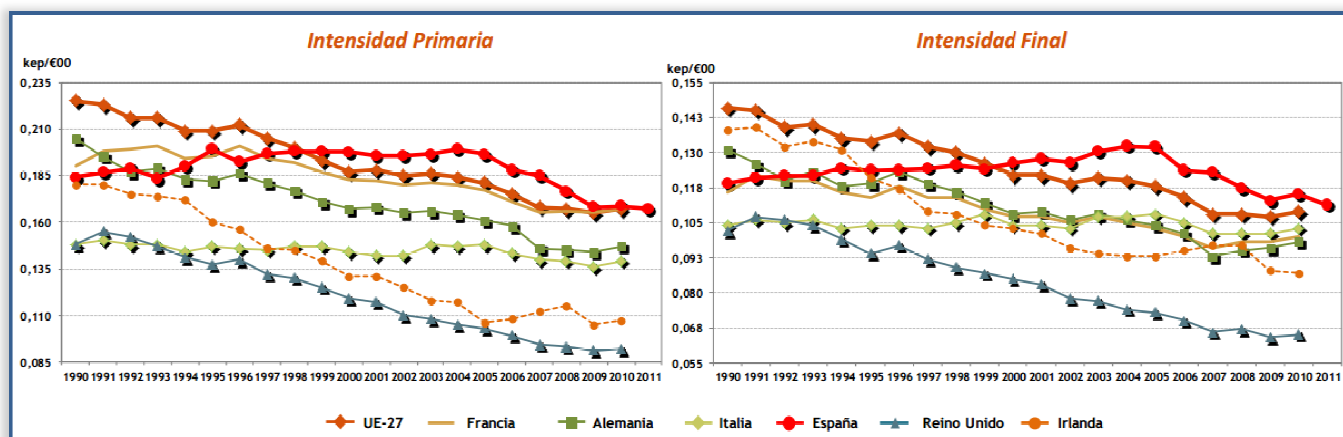
Aspecto de eficiencia energética

La intensidad energética global en España en los últimos 20 años se caracteriza por una evolución creciente entre 1990 y 2004, tanto en la intensidad final como primaria, de la mano del aumento del consumo energético primario. Esta evolución está en contraste con la tendencia del entorno europeo para ese mismo periodo en el que la evolución fue decreciente, resultando unos valores nacionales por encima de la media de la UE.

Para actuar sobre esta tendencia en España se impulsaron políticas de mejora de eficiencia energética, las cuales junto con los cambios estructurales en la economía a partir del año 2000, y el fuerte aumento de los precios energéticos, produjeron una

radical inversión en la progresión de la intensidad energética a partir de 2004 (figura 28).

Figura 28: Comparativa europea de la intensidad energética a nivel macro (expresadas en moneda del año 2000)



Fuente: IDAE, Informe anual de indicadores energéticos, Indicadores relevantes, Año 2011

Entre 2004 y 2007, periodo de auge económico, la demanda energética final creció muy por debajo de la mejora económica, de modo que la intensidad energética final experimentó una reducción de un 6,5% [13]. La fuerte tendencia decreciente continuó entre los años 2008 y 2009, pero por motivos muy distintos a los del periodo anterior ya que en estos años, marcados por la situación de la crisis económica internacional, los sectores de gran consumo como la construcción caen en picado arrojando una disminución del consumo energético en un breve periodo a un ritmo mayor que la caída económica, lo que mantiene la reducción del indicador y la convergencia con su homólogo europeo.

El resultado total para el periodo 2004-2009 es una mejora de la eficiencia energética nacional, evaluada por la intensidad energética, de un 13,4%, [13] con un ritmo de variación superior al promedio europeo. A partir de 2009 esta progresión de la intensidad energética sufre una perturbación de forma que la tendencia a la reducción se ve muy suavizada incluso revertida, fruto de un aumento de la actividad de algunos sectores industriales intensivos en consumo energético junto a la progresiva reducción del PIB derivada del impacto de la crisis financiera.

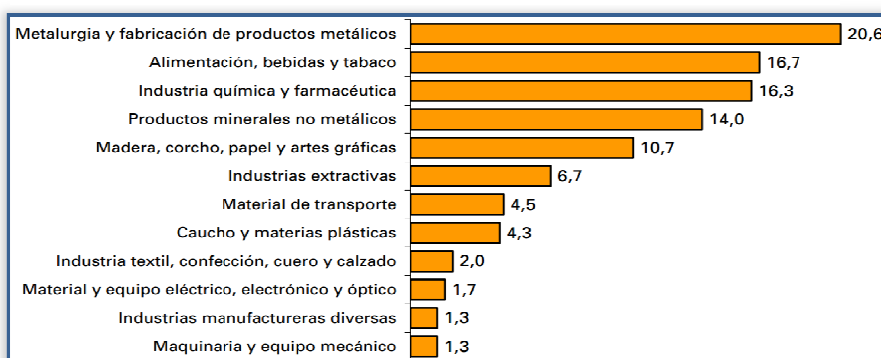
A pesar del periodo de gran mejora de la intensidad energética en España, sus valores (figura 28) se sitúan aún lejanos a los de las principales economías europeas como Reino Unido ó Alemania. Este hecho es achacable en gran parte a la ineficiencia en el transporte español, muy atomizado en comparación al de estos países.

3.2.1. El sector industrial en España

La industria en España, pese a la progresiva reducción de su peso en la economía producto de los cambios estructurales en la misma y a la coyuntura económica actual, representa cerca de una tercera parte del consumo energético final, y es un pilar básico para la creación de riqueza, empleo de calidad, formación especializada, las exportaciones y la investigación e innovación.

La configuración energética de la industria española en base a las agrupaciones de actividad diferenciadas por CNAE, se distribuye según:

Figura 29: Distribución porcentual de los consumos energéticos por agrupaciones de actividad

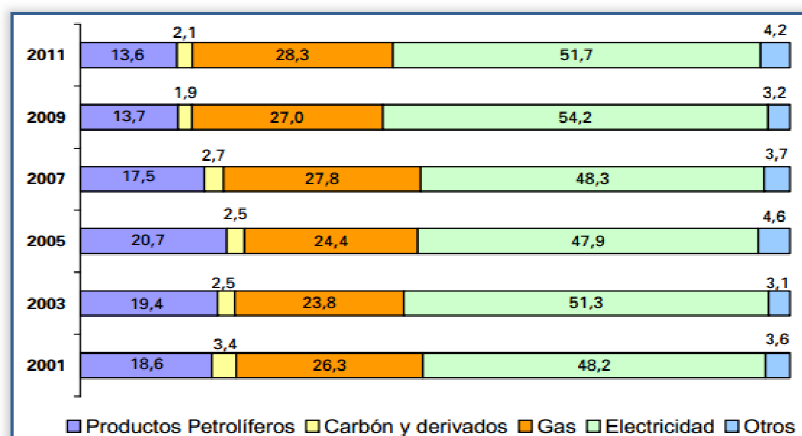


Fuente: INE, Encuesta de Consumos Energéticos 2011, Nota de Prensa

Destacan por encima del resto por su participación en el cómputo total de consumo energético industrial, los sectores de "Metalurgia y fabricación de productos metálicos", "Alimentación, bebidas y tabaco", "Industria química y farmacéutica", "Productos minerales no metálicos" y "Madera corcho papel y artes gráficas".

En lo relativo a la configuración de la demanda energética final por tipo de fuente de energía secundaria, tiene especial importancia el consumo eléctrico, con un peso de más de la mitad del total, seguido por el gas, el cual con representa el 28,3% del consumo total y cuya aportación sigue una tendencia al aumento (figura 30). El protagonismo del petróleo tiende a disminuir situándose en un 13,6% y por último, la contribución del carbón resulta muy reducida con valores de en torno al 2% del total.

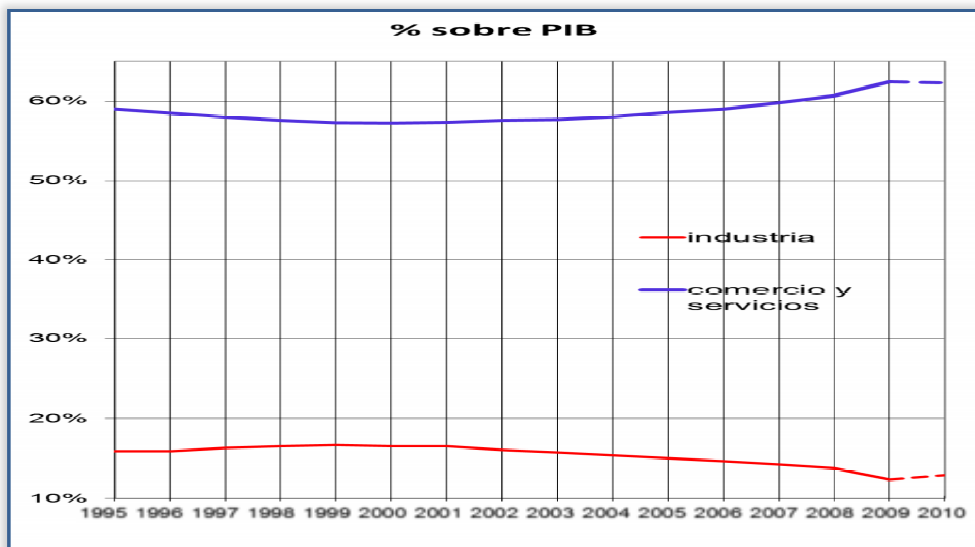
Figura 30: Configuración del consumo industrial final en España por tipo de fuente de energía



Fuente: INE, Encuesta de Consumos Energéticos 2011, Nota de Prensa

La evolución de la actividad industrial en España las últimas dos décadas se ha caracterizado por un aumento de su importancia en la economía en la década 1990-2000, seguido por un progresivo declive de su peso en la década siguiente y en los últimos años. Esta reducción se debe en parte, como ya se ha indicado con anterioridad, a la “terciarización” de la economía, es decir, al cambio estructural de ésta en favor del sector servicios y en detrimento del sector industrial, como se puede apreciar en la figura 31.

Figura 31: Evolución de la participación en el PIB de la industria y del sector terciario

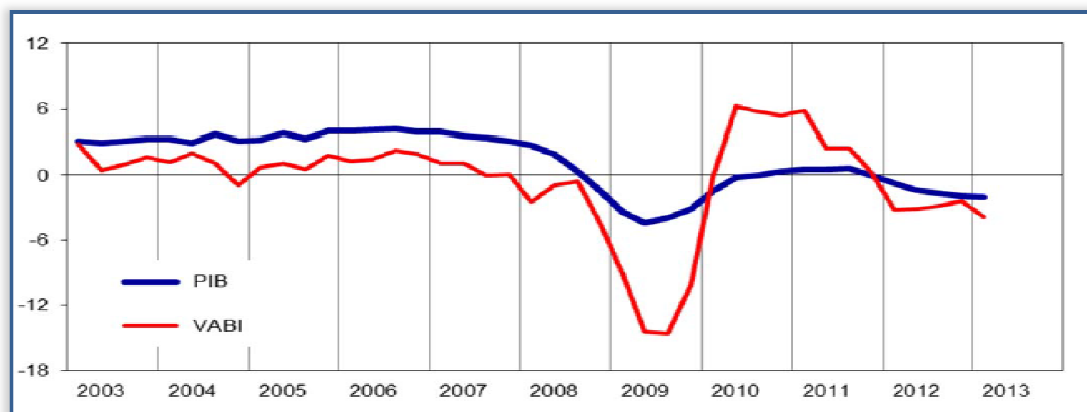


Fuente: MINETUR, Informe Anual 2012

La actividad industrial española, medida por el Valor Añadido Bruto Industrial (VABI), ha seguido una evolución proporcional a la de la actividad económica, ilustrada por el PIB, si bien describiendo este último una trayectoria más suavizada en su variación pero siendo evidente su vinculación y sensibilidad a la evolución de la actividad industrial.

El alto grado de implicación de la crisis financiera en acrecentar la ya desfavorable dinámica de la actividad industrial en España, resulta evidente en base a los registros del VABI de los años 2008 y 2009 con descensos respectivos del 3,4% y 13,1%, de éste indicador (figura 32). [10]

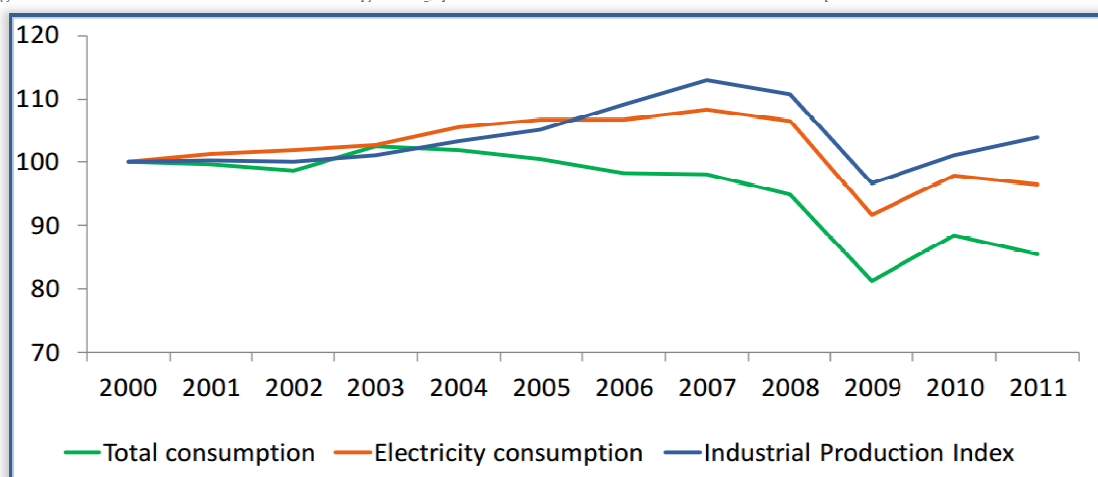
Figura 32: Evolución del VABI frente al PIB (2003-2012), tasas de variación interanual (porcentaje)



Fuente: MINETUR, Informe Anual 2012

En el año 2010 y principios de 2011 se registran datos más positivos, con aumentos del VABI que sugieren una cierta recuperación de su crecimiento, pero estos atisbos se desvanecen con nuevas caídas en el resto de 2011, y los años 2012 y 2013. Esta evolución en la actividad industrial, aunque no de forma tan acusada, se observa también en las principales economías europeas, ya que el índice de producción industrial (IPI) del conjunto europeo (indicador proporcional al VABI), experimenta también un marcado descenso en el año 2009 acompañado de una ligera recuperación posterior (figura 33).

Figura 33: Tendencias de consumo energético y producción industrial en la Unión Europea



Fuente: ENERDATA Energy Efficiency Trends in industry in the EU Lessons from the ODYSSEE MURE project

El peso actual de la industria en España, en base a su aportación al VAB total nacional (VABI / VAB), es de un 16,9%, porcentaje inferior al 19,3% promedio de la Zona Euro (figura 34). Esto contrasta especialmente con países como Alemania o Italia, pese a haberse registrado en el pasado valores superiores con un 20,8% en el año 2000 (figura 30), lo que pone de manifiesto la ya señalada pérdida de importancia estructural del sector en España. [10]

Figura 34: Porcentajes de participación industrial sobre el VAB nacional y sobre el VABI total de la Zona Euro

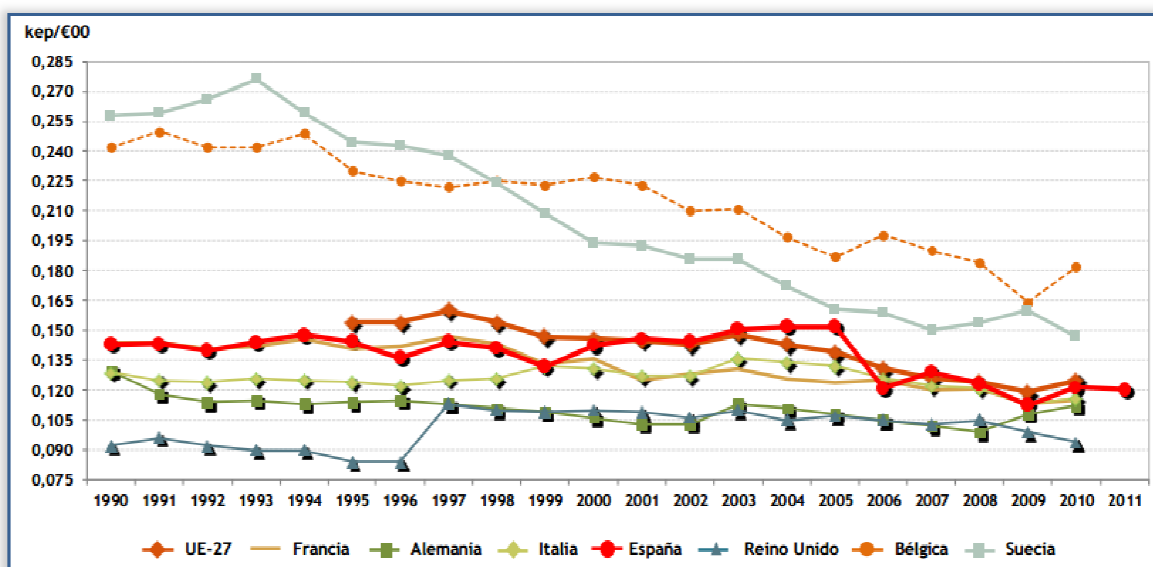
País	VAB en precios corrientes			
	2000		2012	
	% sobre VAB total	% sobre VAB Zona Euro	% sobre VAB total	% sobre VAB Zona Euro
Zona Euro	22,7	100,0	19,3	100,0
Alemania	25,2	34,8	26,0	37,4
España	20,8	8,9	16,9	9,9
Francia	17,8	17,2	12,5	13,9
Italia	22,7	18,2	18,3	15,6
Portugal	20,3	1,7	18,5	1,6
Reino Unido	20,8	22,1	16,1	16,5

Fuente: MINETUR, Informe Anual 2012

En términos de aportación española al VAB industrial total de la Zona Euro, ésta representa sólo un 9,9% del total. Muy lejos de los 37,4% de Alemania, el 16,5% del Reino Unido o el 15,6% de Italia, aunque este parámetro ha mostrado una mejoría de un 1% respecto al año 2000.

La intensidad energética de la industria en España muestra una evolución análoga a la intensidad total nacional, si bien, con valores más acordes a los principales países del entorno europeo, diferenciándose dos contrastadas tendencias que tienen su punto de inflexión en torno al año 2004. (figura 35).

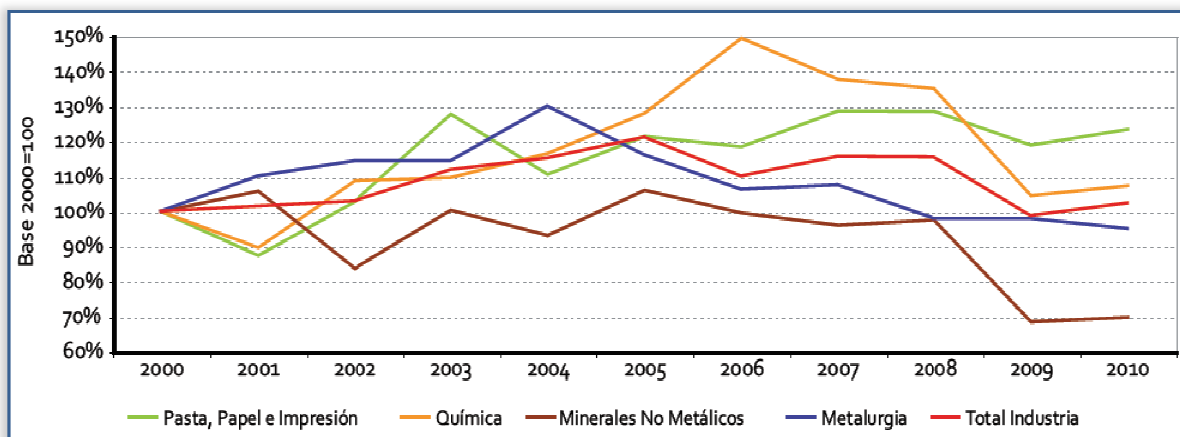
Figura 35: Comparativa Europea de la Intensidad Energética del Sector Industria (base moneda del año 2000)



Fuente: IDAE, Informe anual de indicadores energéticos, Indicadores relevantes, Año 2011

Industrias como la cementera (minerales no metálicos), la metalúrgica o la química venían registrando una evolución muy favorable en su intensidad energética durante el periodo 2004-2009 (figura 32) a consecuencia de mejoras de eficiencia energética implementadas en sus procesos. Esta evolución se ve truncada al término de dicho periodo, dando pie a la tendencia actual.

Figura 36: Evolución comparativa de la intensidad energética de las ramas industriales más intensivas (España)



Fuente: MINETUR, La Energía en España 2011

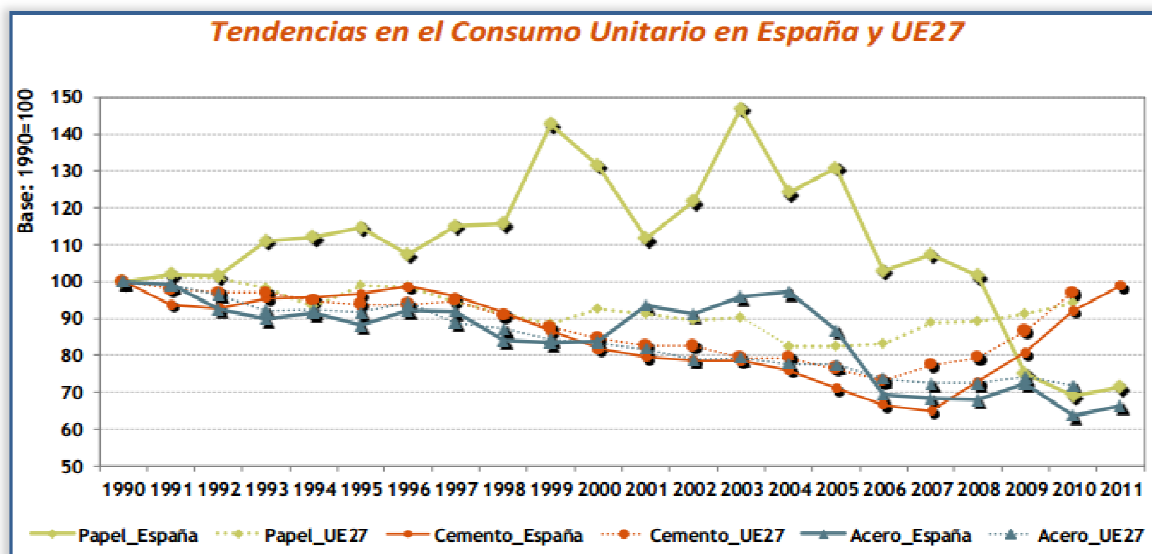
Este empeoramiento reciente de la intensidad energética industrial se debe a que la coyuntura económica actual, como ya se ha mencionado con anterioridad, ha ocasionando una paralización en el ritmo de actividad de las empresas industriales, lo que distorsiona la operatividad de las instalaciones y equipamiento asociado, produciendo un empeoramiento de su rendimiento y eficiencia, ya que una reducción de la producción o de la actividad industrial, no es directamente proporcional a la minoración del consumo energético.

Ante una reducción de la operatividad, los equipamientos implicados en el proceso productivo ya sean calderas, hornos o motores, funcionarán por debajo de su plena capacidad, con un rendimiento inferior al óptimo. Además existen demandas energéticas fijas e independientes del nivel de actividad como pueden ser la iluminación, la calefacción o el acondicionamiento de las instalaciones, que al mantenerse invariables en presencia de volúmenes de producción más reducidos hacen que se produzca una disminución en la eficiencia energética.

En el análisis del estado de la intensidad energética en las ramas industriales más importantes, destacan los ya señalados resultados positivos de las industrias de minerales no metálicos y metalurgia, ambas con valores inferiores al promedio de la industria española (figura 36), frente valores menos favorables de la industrias química y en especial del papel, aunque la primera de ellas mostró una gran mejoría en el periodo previo a la crisis.

Pese al reciente empeoramiento registrado, el estado actual de la eficiencia energética en las principales ramas industriales españolas respecto a los valores del promedio europeo en las mismas, muestra resultados comparativos positivos para España tanto en la fabricación de cemento como de acero o papel (figura 33).

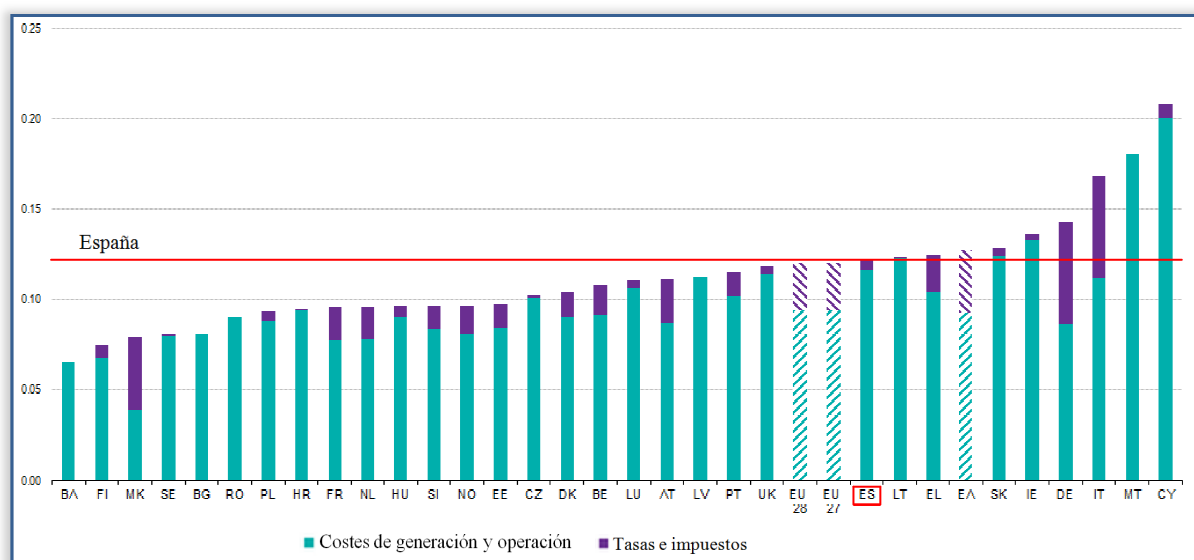
Figura 37: Comparación respecto a Europa de la intensidad energética en industrias cemento, acero y papel.



Fuente: IDAE, Informe Anual de Indicadores Energéticos de detalle, 2011

A los principales problemas de la industria española ya analizados (cambio estructural de la economía e impacto de la crisis financiera), se une su progresiva pérdida de competitividad, derivada de las continuadas subidas de los precios de adquisición de la energía y muy en especial los de la electricidad, los cuales son superiores a los de los principales competidores europeos (figura 38).

Figura 38: Precios de la electricidad en Europa para consumidores industriales 2013 (€/kWh)



Fuente: European Commission, Eurostat, Electricity and natural gas price statistics

Estas grandes diferencias en el precio de la electricidad con respecto a Europa no tienen su origen en los costes de generación y operación, sino que son principalmente atribuibles a los grandes aumentos en los impuestos aplicados a la generación, derivados de decisiones gubernamentales como las recientes reformas para la reducción del déficit tarifario que se produjo como consecuencia de la desmedida política de primas al régimen especial.

Este hecho tiene un alto impacto en la viabilidad y la competitividad de la industria española, de forma que los márgenes de beneficio quedan muy reducidos, al mismo tiempo que aumenta la distancia con los principales países competidores. [14]

3.2.2. Normativas, planes y estrategias de ahorro y eficiencia energética en Europa y España

Los objetivos y las actuaciones en materia de eficiencia energética en España así como los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y de participación de energías renovables, se enmarcan dentro de los objetivos y avances normativos fijados por las instituciones comunitarias.

Por ello, la evolución histórica de las normativas de ahorro y eficiencia energética nacionales, han de ser estudiadas teniendo en cuenta que siempre van a estar sujetas a los dictados de las instituciones de la Unión Europea, puesto que si una Directiva Europea es aprobada, es obligación de los Estados Miembros trasponer la Directiva en cuestión a su ordenamiento jurídico antes de un período fijado.

España publica el 30 de diciembre de 1980 la primera normativa relativa a la eficiencia energética: la ley 82/1980. En el artículo primero de dicha ley se indica que el objetivo de la misma es establecer normas y principios básicos con los que se optimicen los siguientes aspectos: [15]

- Rendimientos de los procesos de transformación de la energía.
- Potenciar la adopción de fuentes de energía renovables, reduciendo en lo posible el consumo de hidrocarburos y en general la dependencia exterior de combustibles.
- Promover la utilización de energías residuales de procesos industriales, así como la reducción de pérdidas, gastos e inversiones en transportes de energía.
- Analizar y controlar el desarrollo de proyectos de creación de plantas industriales de gran consumo de energía, según criterios de rentabilidad energética a nivel nacional.
- Regular las relaciones entre los autogeneradores y las compañías eléctricas distribuidoras.
- Fomentar las acciones técnica y económicamente justificadas, encaminadas a reducir la dependencia energética exterior.

Posteriormente las nuevas acciones en materia de eficiencia energética vienen dadas por la creciente preocupación por el medio ambiente que se refleja en el Acta Única Europea de 1986 y en el Protocolo de Kioto en 1998, en el que la Unión Europea asume una serie de compromisos de ahorro de energía y emisiones contaminantes como freno del cambio climático. En referencia a ello la Directiva 2002/91/CE afirma lo siguiente:

“El fomento de la eficiencia energética constituye una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para cumplir lo dispuesto en el Protocolo de Kyoto, y debe estar presente en todas las medidas que se adopten con el fin de dar cumplimiento a nuevos compromisos”

En lo relativo a normativa europea, en una etapa ya más reciente, se comienzan a establecer objetivos cuantificados de eficiencia energética. En el “Plan de acción sobre eficacia energética (2000-2006)”, la Comisión presentó medidas para la mejora energética en un 1% anual hasta 2010 [16]. Aunque este plan de acción no es publicado en el Diario Oficial, su objetivo era reducir el consumo de energía y mejorar la eficacia energética con el fin de proteger el medio ambiente, reforzar la seguridad del abastecimiento de energía y crear una política energética más sostenible.

En la **Directiva 2006/32/CE** del Parlamento y Consejo Europeo relativa al uso final de la energía y a los servicios energéticos, se establece un objetivo de ahorro de energía aplicable a los estados miembros del 9% hasta 2016. Esta Directiva surge a raíz del Libro Verde publicado en 2005 en el que se apuntaba que de no adoptar ninguna medida el nivel de dependencia energética de la Unión Europea pasaría del 50% de ese momento a un 70% en 2030. [17]

En esta Directiva se define un marco general para la verificación y medición de los ahorros y se establece la obligatoriedad para los Estados Miembros de elaborar tres Planes Nacionales de Ahorro y Eficiencia Energética. El primero de ellos debe ser entregado a la Comisión por los Estados Miembros antes del 30 de junio de 2007, el segundo antes del 30 de junio de 2011 y el tercero antes del 30 de junio de 2014. La Directiva recoge adicionalmente, como ya se apuntó en el Capítulo 2 del presente TFG, la figura de la Empresa de Servicios Energéticos (ESE) y el procedimiento de auditoría energética.

En cuanto al sector industrial, la Directiva 2006/32/CE propone acciones de mejora de la eficiencia energética en los siguientes ámbitos: [17]

- Manufactura de productos (uso más eficiente del aire comprimido, interruptores y válvulas, uso de sistemas integrados automáticos, modos de espera eficientes).
- Motores y mandos (aumento del uso de controles electrónicos, mandos de regulación de la velocidad, programación integrada de la aplicación, conversión de frecuencias, motor eléctrico de alta eficiencia).
- Ventiladores, mandos de regulación de la velocidad y ventilación (nuevos dispositivos/sistemas, uso de la ventilación natural).
- Gestión la demanda (gestión de la carga, sistemas de control de los picos).
- Cogeneración de alta eficiencia (aparatos de cogeneración de calor y electricidad)

El 19 de octubre de 2006 la Comisión Europea presenta el “Plan de acción para la eficiencia energética: realizar el potencial” para el período 2007-2012. El objetivo de este plan de acción es controlar y reducir la demanda energética actuando de forma selectiva en lo relativo al consumo y abastecimiento de energía para conseguir un ahorro del 20% del consumo de energía primaria, lo que supone una reducción del 1,5% anual hasta 2020. [18]

En esta misma línea, el Consejo de primavera de Bruselas celebrado en marzo de 2007 recoge los siguientes objetivos fijados por presidencia conocidos como **objetivos 20 20 20**: [19]

- Producir la transformación de Europa en una economía de alta eficiencia energética y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello la UE formula un compromiso firme e independiente de lograr al menos una reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero hasta 2020 en comparación con 1990.
- Establecer el objetivo vinculante para los Estados Miembros del 20% de energías renovables en el consumo total de energía de la UE en 2020.
- Llevar a cabo un incremento de la eficiencia energética para lograr el objetivo de ahorrar un 20% del consumo de energía de la UE en comparación con los valores proyectados para 2020, en base a las estimaciones de la Comisión en su Libro Verde sobre la eficiencia energética.

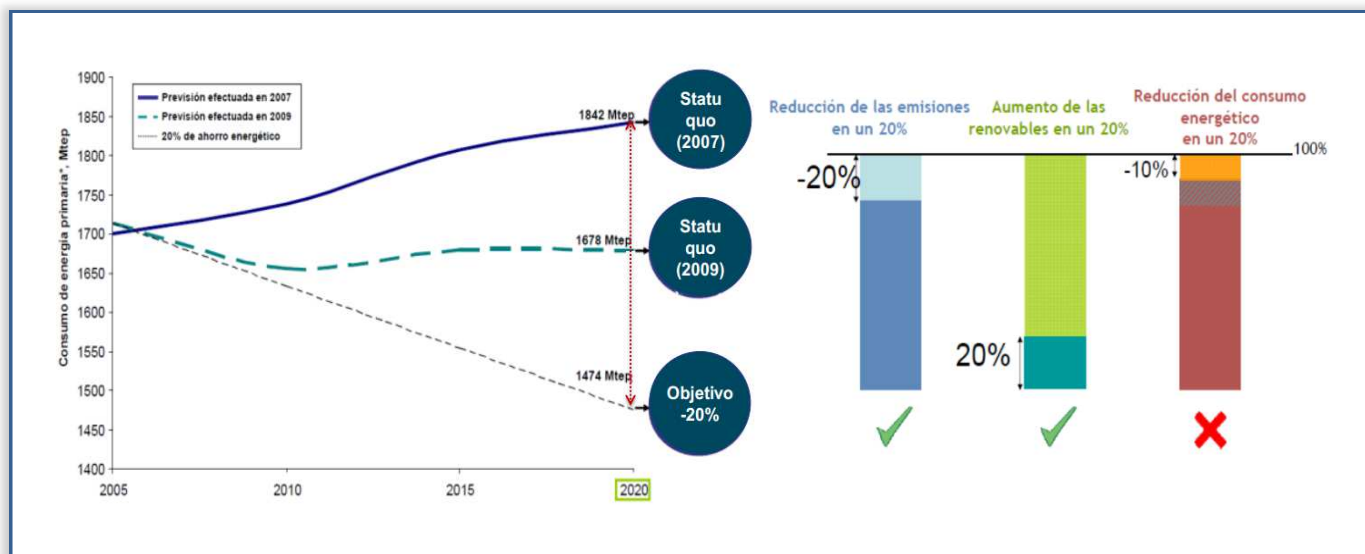
En la **Directiva 2010/75/EU** del Parlamento y Consejo Europeo, se exige a la Comisión que organice un intercambio de información entre ella y los Estados miembros, las industrias y las organizaciones no gubernamentales a fin de facilitar la elaboración de los documentos de referencia sobre las mejores técnicas disponibles (**MTD**). El análisis en detalle de las mismas para las industrias objeto de estudio en el presente documento se realizara en los Capítulos 5, 6 y 7.

“A fin de determinar las mejores técnicas disponibles y limitar los desequilibrios en la Unión en cuanto al nivel de emisiones procedentes de las actividades industriales, se elaborarán, revisarán y, cuando proceda, se actualizarán los documentos de referencia sobre las mejores técnicas disponibles (MTD)” [20]

Directiva 2010/75/EU

En marzo de 2011 la Comisión comunica al Parlamento Europeo el “**Plan de Eficiencia Energética 2011**” para la consecución del objetivo triple 20, ya que la Unión Europea no se encontraba en el camino de cumplir el objetivo del 20% de eficiencia energética. Como se puede apreciar en la figura 39, los escenarios tendenciales se situaban lejos de la meta de demanda energética primaria para el año 2020.

Figura 39: Escenarios tendenciales de reducción de consumo energético de 20%



Fuente: CNE, “La nueva directiva de la UE sobre eficiencia energética”

En cuanto al sector industrial este plan apunta: “La eficiencia energética en la industria se abordará mediante requisitos en materia de eficiencia energética aplicables a los equipos industriales, la mejora del suministro de información a las PYME y medidas destinadas a introducir auditorías energéticas y sistemas de gestión de la energía. También se proponen mejoras de la eficiencia en la producción de electricidad y calor”. [21]

Hasta el momento, la última normativa europea en materia de ahorro y eficiencia energética es la **Directiva 2012/27/UE** del Parlamento Europeo y del Consejo, la cual supone una revisión de las anteriores directivas de esta índole, derogando la normativa 2006/32/CE y estableciendo acciones para llevar a la práctica las propuestas del Plan de Acción de 2011. Esta Directiva se publica con el fin de conseguir alcanzar el objetivo de mejora de la eficiencia energética en la UE en un 20% para 2020.

Establece en su Artículo 7 un objetivo vinculante de ahorro de energía primaria de un 1,5% anual entre los años 2014 y 2020 de las ventas de energía a clientes finales de todos los distribuidores de energía o empresas minoristas de venta de energía con un sistema de medición, control y verificación que compruebe de forma independiente la consecución del ahorro. [22]

En su Artículo 8, se establece la obligatoriedad de que las empresas “no PYMES” (entre las cuales estaría la industria) se sometan a una auditoría energética realizada de manera independiente como mínimo cada 4 años, eximiéndose a aquellas que apliquen un sistema de gestión energética o medioambiental certificado, siendo válidos los sistemas de acuerdo a la norma **UNE-EN-ISO 50001**. [22]

Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012

En España, al igual que en gran parte de los países de la Unión Europea, existe un organismo específicamente encargado de la eficiencia y el ahorro energético, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), entidad pública empresarial adscrita al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio desde junio de 2004.

Las principales medidas en materia de eficiencia energética a nivel nacional parten de la "Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4)". Esta Estrategia se ha desarrollado en dos planes: El Plan de Acción 2005-2007 y el Plan de Acción 2008-2012.

La estrategia 2004-2012 (E4), aprobada en noviembre de 2003, tenía por objeto reducir los consumos energéticos contribuyendo a la mejora de la competitividad de la industria española y a la reducción de la contaminación, para lo que proponía una serie de medidas en los principales sectores consumidores de energía. Sin embargo, en ella no se precisaban ni las acciones específicas, ni los plazos, ni las responsabilidades de las diferentes instituciones y tampoco la financiación.

Por ello fue necesaria la adopción por parte del Gobierno, de sucesivos Planes de Acción para resolver esta indefinición, concretando las acciones que se debían ponerse en marcha para cada sector, detallando objetivos, plazos, recursos y responsabilidades y evaluando finalmente los impactos globales resultantes de estas actuaciones.

Estos planes de acción han centrado sus esfuerzos en siete sectores: industria, transportes, edificación, servicios públicos, equipamiento residencial y ofimática, agricultura y pesca y transformación de la energía. [23]

Plan de acción 2008-2012

Dentro de la Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012 se estableció el Plan de Acción 2008-2012, remitido a la Comisión Europea como primer Plan Nacional de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética de los tres que la Comisión obliga a presentar a los Estados Miembros en la Directiva 2006/32/CE.

El Plan se focaliza en los sectores denominados como difusos (transporte y edificación) y propone objetivos de ahorro más ambiciosos que los establecidos en el Plan anterior (Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2005-2007). [23]

El Plan de Acción 2008-2012 comprende un volumen importante de actuaciones estructuradas por sectores y ejes estratégicos. Las medidas a llevar a cabo se dividen en cuatro categorías: [24]

- Actuaciones legislativas, en general de largo alcance y que representan un conjunto complejo de recomendaciones, reglamentos, normas de buen funcionamiento, restricciones, y en general normativa de obligado cumplimiento.
- Medidas incentivadoras para que se lleven a cabo auditorías y análisis de los consumos de las tecnologías utilizadas, y se promuevan inversiones en equipamientos que aumenten la eficiencia energética.
- Formación en buenas prácticas, en el conocimiento de las tecnologías disponibles, de los avances y las nuevas técnicas de gestión de la demanda, del consumo y en general del correcto uso de la energía.
- Difusión de recomendaciones, cultura del ahorro, conocimiento de los impactos, las pérdidas de la cadena productiva y transformadora, etc.

En lo que respecta al sector industrial, el Plan de Acción 2008-2012 incluye cuatro tipos de medidas: [24]

- Auditorías energéticas: Detectar el potencial y facilitar la toma de decisión de inversión en ahorro de energía.
- Acuerdos voluntarios: Compromiso de las asociaciones empresariales para alcanzar el ahorro de energía potencial, fomentar la adopción de medidas de ahorro para la industria.
- Programa de ayudas públicas: Facilitar la viabilidad económica de las inversiones en ahorro energético.
- Actuación legislativa: inclusión de una evaluación específica de impactos energéticos en todos los proyectos de industria.

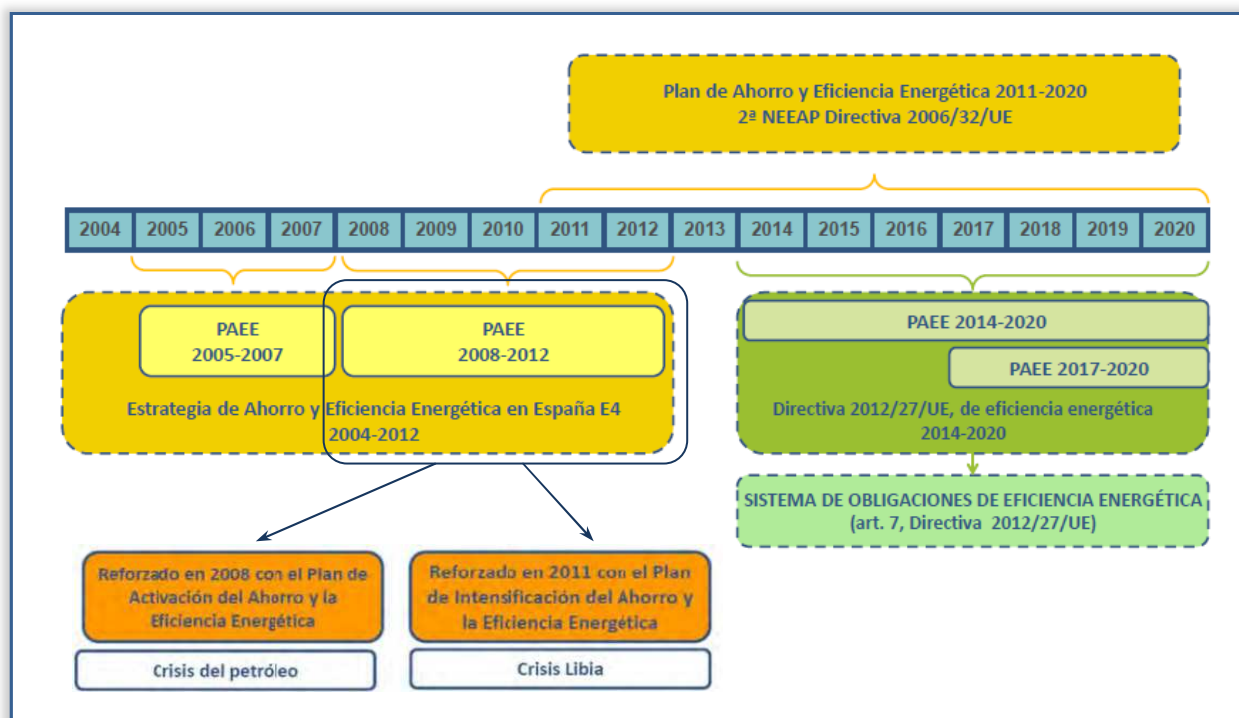
Enmarcados en este Plan de Acción, para la intensificación de los esfuerzos y la toma de medidas urgentes ante las nuevas coyunturas socioeconómicas, se presentaron dos nuevos planes: “Plan de Activación del Ahorro y la Eficiencia Energética 2008-2011” (aprobado en 2008 en un contexto de elevados precios del petróleo) y el “Plan de Intensificación del Ahorro y la Eficiencia Energética” (aprobado en 2011 en el contexto de la crisis Libia). El primero de ellos permitiría según los cálculos del Gobierno, ahorrar el equivalente al 10% de las importaciones anuales de petróleo de España. [25]

Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020

Mientras no se presenten los nuevos planes de Ahorro y Eficiencia Energética nacionales conforme a lo establecido en la Directiva 2012/27/UE, la regulación vigente en España es el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 que se presentó como respuesta a la obligatoriedad recogida en la Directiva 2006/32/CE de presentar un segundo Plan de Acción nacional antes del 30 de junio de 2011.

Este plan da continuidad a los planes de ahorro y eficiencia energética aprobados por el Gobierno español en el marco de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012 (E4) e incluye un análisis y evaluación del Plan de Acción anterior, así como el uso indicadores de eficiencia y valores de referencia, para la valoración de las medidas pasadas y de los efectos estimados de las futuras medidas programadas.

Figura 40: Esquema cronológico de los Planes y Estrategias de Ahorro y Eficiencia Energética en España.



Fuente: Observatorio Industrial del Sector del Metal, “Los grandes consumidores de energía eléctrica: coste y eficiencia energética”

Por ello a continuación se procede a detallar el contenido del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética español 2011-2020 y el análisis que en éste se recoge del Plan de Acción previo (Plan 2008-2012).

A nivel sectorial, los ahorros de energía final del Plan de Acción 2011-2020 se concentran en el Sector Transporte, al que se atribuye el 51% del total de los ahorros en 2020. Le sigue en importancia el Sector Industria, con ahorros equivalentes al 25% del total. Estos ahorros pretenden dar como resultado una disminución del consumo de

energía final, entre los años 2007 y 2020, del 13% en el Sector Industria y del 5% en el Sector Transporte. [26]

En el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 se presentan los siguientes objetivos a 2020: [26]

- Consumo de energía primaria para 2020 de 102.220 ktep, lo que representa una mejora de la intensidad final de un 2% interanual entre 2010 y 2020.
- Mejora de la intensidad primaria un 1.5% interanual entre 2010 y 2020 (con un crecimiento estimado del PIB de un 2.3% interanual).

Para el sector industrial, las emisiones evitadas así como los ahorros energéticos primarios y finales proyectados para cada fase y para la totalidad del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 se precisan en la figura 41, en función de cada una de las tres actuaciones a llevar a cabo.

Figura 41: Ahorros de energía y emisiones proyectadas en el plan 2011-2020 para el sector industrial.

	Ahorros de energía final (ktep)		Ahorros de energía primaria (ktep)		Emisiones evitadas de CO ₂ (ktCO ₂)		Apoyos de gestión pública (M€)		
	2016	2020	2016	2020	2016	2020	2011-2016	2017-2020	2011-2020
Industria	2.489	4.489	2.151	4.996	5.233	11.641	450	300	750
Auditorías energéticas							4,7	3,1	7,8
Mejora de la tecnología de equipos y procesos (MTD)	2.332	4.154	2.016	4.623	4.905	10.772	444,2	296,1	740,3
Implantación de sistemas de gestión energética	156	335	135	373	328	869	1,2	0,8	2,0

Fuente: IDAE, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, Julio de 2011

Respecto a los fondos dedicados por el sector público para cada una de estas actuaciones destaca la suma de 740,3 millones de euros destinados a la mejora de la tecnología de equipos y procesos, frente a los 7,8 destinados a la realización de auditorías energéticas y los 2 para la implantación de sistemas de gestión energética.

Los objetivos de ahorro de consumo energético final en el sector industrial para 2016 y 2020 se sitúan respectivamente en un 8,7 y un 14,8% (figura 42).

Figura 42: Ahorros de energía final por sectores respecto a 2007 (en ktep y en porcentaje respecto al total de consumo del sector)

	2016		2020	
	(ktep)	(%)	(ktep)	(%)
Industria	2.489	8,7	4.489	14,8
Transporte	6.921	15,2	9.023	18,9
Edificación y equipamiento	2.674	9,3	2.867	9,7
Servicios públicos	56	6,7	125	14,7
Agricultura y pesca	1.036	23,3	1.338	27,9
Total ahorros energía final	13.176	12,2	17.842	15,8

Fuente: IDAE, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-202, Julio de 2011

Como ya se ha indicado, en el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, se realiza una evaluación de los resultados de los planes previos. Los resultados del análisis del periodo 2004-2010 (en el cual estaba en vigor de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012) se muestran en la figura 43. El análisis se lleva a cabo tomando los valores del año 2010 respecto a los años base 2004 y 2007.

Figura 43: Evaluación de ahorros y emisiones evitadas por sectores, periodo 2004-2010

	2010					
	Base 2004			Base 2007		
	Ahorros E. final (ktep)	Ahorros E. primaria (ktep)	Emisiones evitadas CO ₂ (ktCO ₂)	Ahorros E. final (ktep)	Ahorros E. primaria (ktep)	Emisiones evitadas CO ₂ (ktCO ₂)
Industria	-799	-2.696	-5.282	-2.866	-5.717	-12.417
Transporte	6.451	6.874	21.471	4.561	4.909	13.330
Edificación y equipamiento	2.232	3.165	6.983	2.529	4.189	9.269
Servicios públicos	32	80	161	29	67	144
Agricultura y pesca	426	535	1.526	467	580	1.673
Total sectores finales	8.342	7.958	24.859	4.720	4.029	12.000

Fuente: IDAE, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-202, Julio de 2011

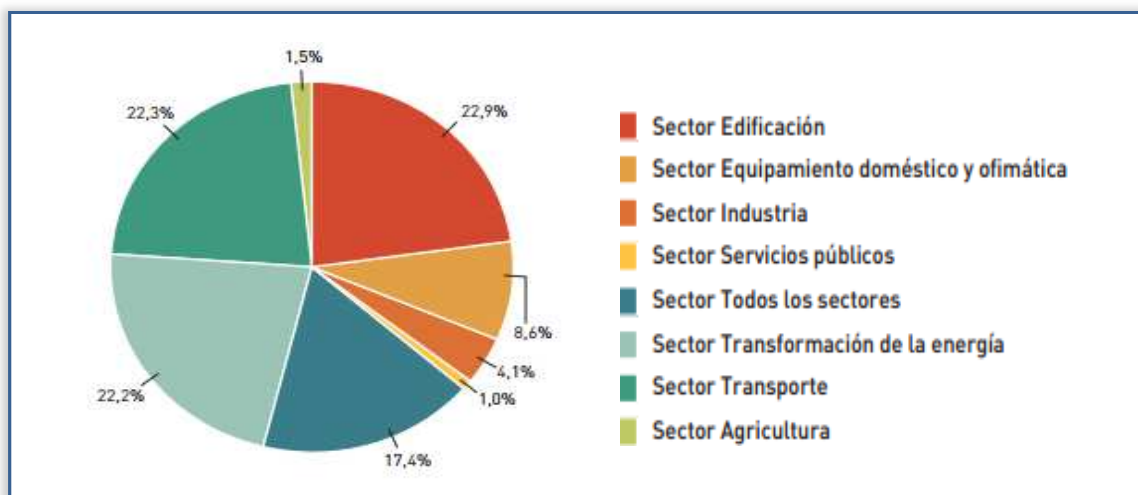
El total de los ahorros es de 4.720 ktep en base 2007, y de 8.342 ktep, en base 2004. Los ahorros se han determinado, en todos los casos, como resultado de la diferencia de consumo energético del año base respecto al consumo de 2010.

El ahorro del sector industrial presenta un signo negativo debido a que, como ya se ha descrito en el apartado previo, se ha producido un incremento de la intensidad energética en el sector debido a la caída de producción como resultado de la crisis económica que atraviesa el país. Es decir, como consecuencia de los menores niveles de

producción industrial entre 2004 y 2010, de la pérdida de valor añadido y de la imposibilidad de reducir los consumos energéticos de forma paralela a la reducción de los niveles de producción. [27]

La distribución por sectores del efecto directo de las mejoras eficiencia energética en términos del VAB en 2009 se recoge en la figura 44. Como se puede observar, las mejoras eficiencia energética han supuesto un aumento del Valor Añadido Bruto Industrial del 4,1%. [26]

Figura 44: Distribución sectorial del efecto de las mejoras de eficiencia energética en el aumento del VAB, 2009



Fuente: IDAE, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, Resumen ejecutivo, Julio de 2011

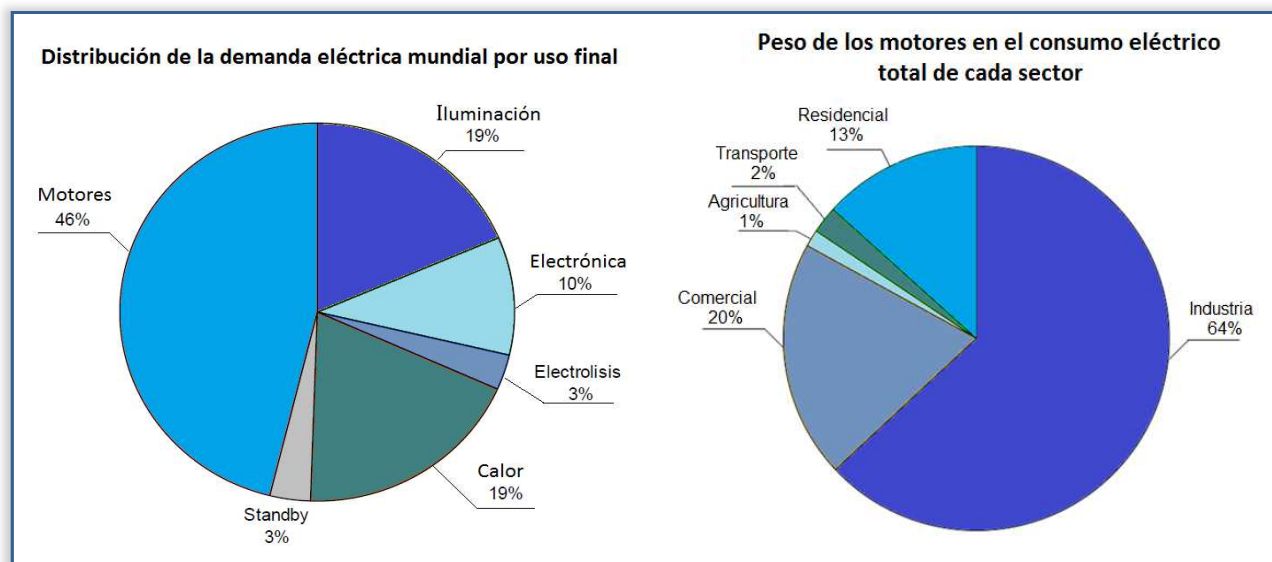
Capítulo 4. Análisis de sistemas y procesos industriales generales

4.1. Motores eléctricos y variadores de velocidad

La función de un motor eléctrico es convertir la energía eléctrica en energía mecánica para realizar un trabajo útil. Los motores son la base de todos los procesos que necesitan de potencia mecánica para su funcionamiento y son la fuente de la fuerza industrial, desempeñando tareas fundamentales como el accionamiento de maquinaria, compresores, bombas, ventiladores o cintas transportadoras.

Los accionamientos eléctricos son responsables, según estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía, de entre un 44 y un 46% del consumo eléctrico a nivel mundial [1]. Su protagonismo en la industria resulta aún mayor dado que su implicación en el consumo eléctrico total en ella se sitúa entre un 60 y un 70% (figura 45). [2]

Figura 45: Usos finales del consumo eléctrico mundial / Peso de los motores en el consumo eléctrico total por sector

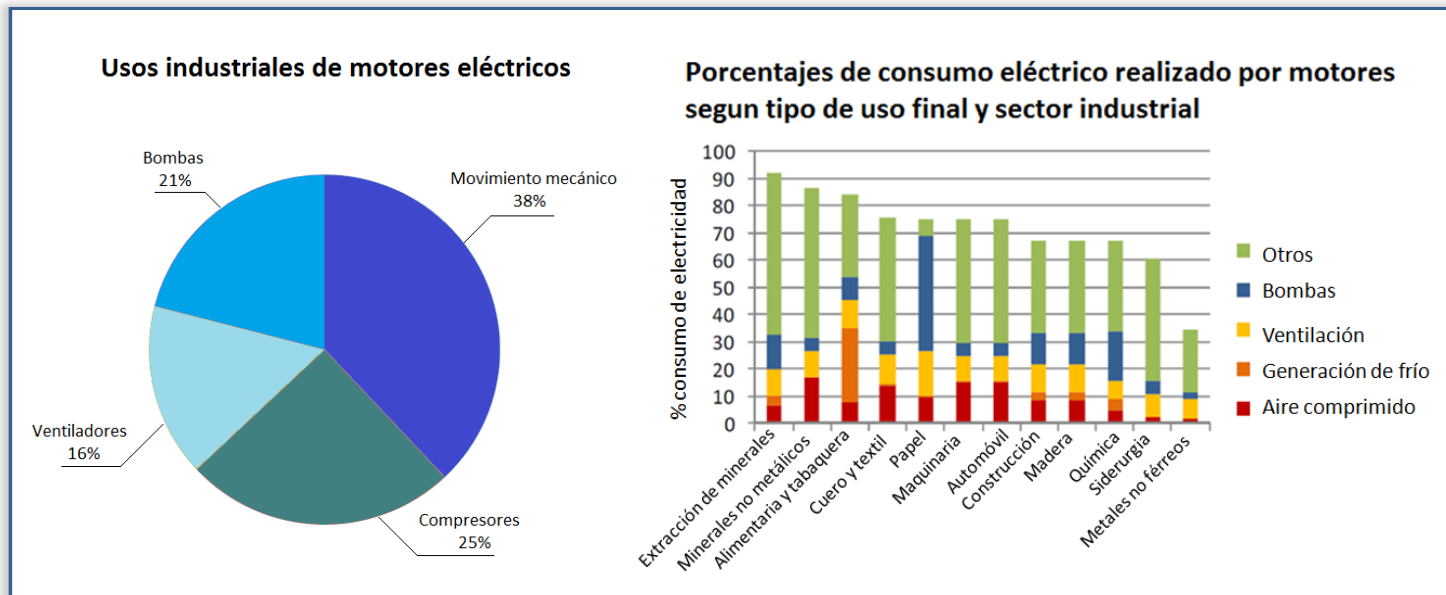


IEA, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems ", 2011

La distribución del consumo eléctrico para cada una de las aplicaciones desempeñadas por motores en la industria, (gráfico circular de la figura 46), se caracteriza por un predominio de la realización de trabajo puramente mecánico (38%), seguido por la utilización para el accionamiento de compresores (25%), bombas (21%) y ventiladores (16%) [1]. Estas son el promedio de la industria pero, en la práctica, tanto la presencia de cada tipo de aplicación como el peso que la totalidad de ellas

representa en consumo eléctrico de la planta industrial pueden ser muy variables en función qué tipo de planta se trate, como se puede apreciar en el gráfico de barras de la figura 46.

Figura 46: Consumo eléctrico de motores por tipos de uso y por sectores industriales



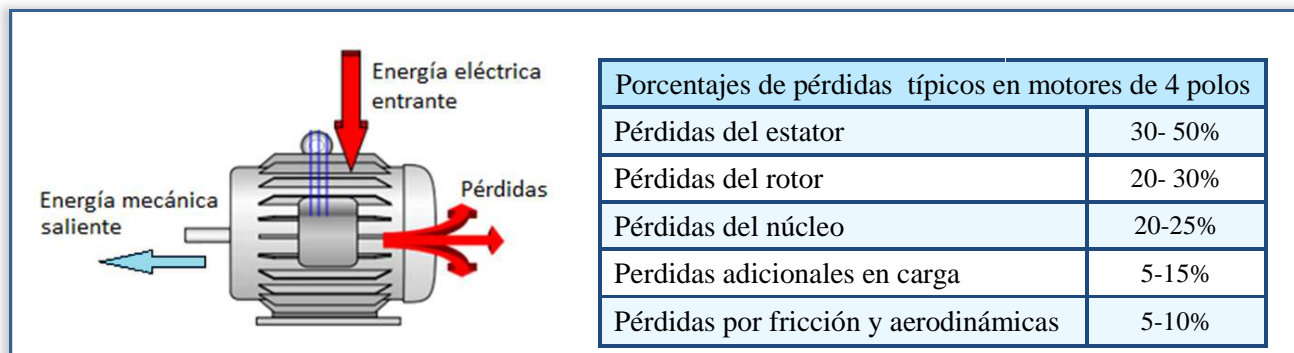
Fuentes: UNIDO "Energy efficiency in electric motor systems: Technology saving potentials and policy options for developing countries", 2012 / IEA, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems", 2011

Las industrias en las que los motores eléctricos tienen un mayor protagonismo en el consumo eléctrico total (y por tanto aquellas que podrían verse más beneficiadas por medidas de eficiencia energética en este ámbito) son: la de "extracción de minerales" con un porcentaje en el consumo eléctrico total por parte de los motores de más de un 90%, las industrias de "minerales no metálicos", "alimentaria" o "textil" (cuyos ratios están en torno al 85%) y la "industria del papel" con un 75%.

En las aplicaciones predominantes de los motores eléctricos en cada uno de los sectores, es destacable la elevada presencia de generación de frío en la industria alimentaria, así como de sistemas de bombeo y de ventilación en la industria del papel. En esta última (objeto de estudio en el presente TFG), como se ha apuntado, existe un alto grado de implicación de los motores en el consumo eléctrico total (75%), con lo que la mejora de la eficiencia energética en bombas y ventiladores podría conducir a grandes beneficios energéticos y económicos. Los potenciales de ahorro energético medio estimados en estas aplicaciones son del 20 y el 22% respectivamente. [2]

En el proceso de transformación de energía eléctrica en mecánica que tiene lugar en un motor eléctrico, una parte de la energía eléctrica tomada de la red se convierte en calor, constituyendo una pérdida inherente al motor que representa en torno a un 6% en un motor estándar [3]. La optimización de las características constructivas de los motores permite reducir estas pérdidas dando lugar a un gran potencial de ahorro energético.

Figura 47: Pérdidas en un motor eléctrico



Fuente: CNEE "Taller promotores de ahorro y eficiencia de energía eléctrica"/ IEA, "Energy-EfficiencyPolicyOpportunitiesforElectricMotor-DrivenSystems ", 2011

La magnitud de las pérdidas que se producen en la transformación determinan el rendimiento de un motor y por tanto su eficiencia energética. Esto depende directamente de los materiales de fabricación y del diseño mecánico y eléctrico del motor.

Los motores energéticamente eficientes utilizan materiales de alta calidad e integran un diseño mejorado para conseguir que se produzcan las mínimas pérdidas. Algunos de los aspectos técnicos involucrados en esta mejora son el mayor volumen de cobre en el estator, el diseño más eficiente del ventilador y las ranuras, o una laminación más delgada del acero y la mejora de las propiedades de éste.[4]

La norma EN 60034-31 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) de 2010 define, conforme a la eficiencia de los motores eléctricos asíncronos trifásicos, las siguientes clases de eficiencia: [3]

- ❖ IE1 = Eficiencia Estándar
- ❖ IE2 = Alta Eficiencia
- ❖ IE3 = Eficiencia Premium
- ❖ IE4 = Eficiencia Súper Premium

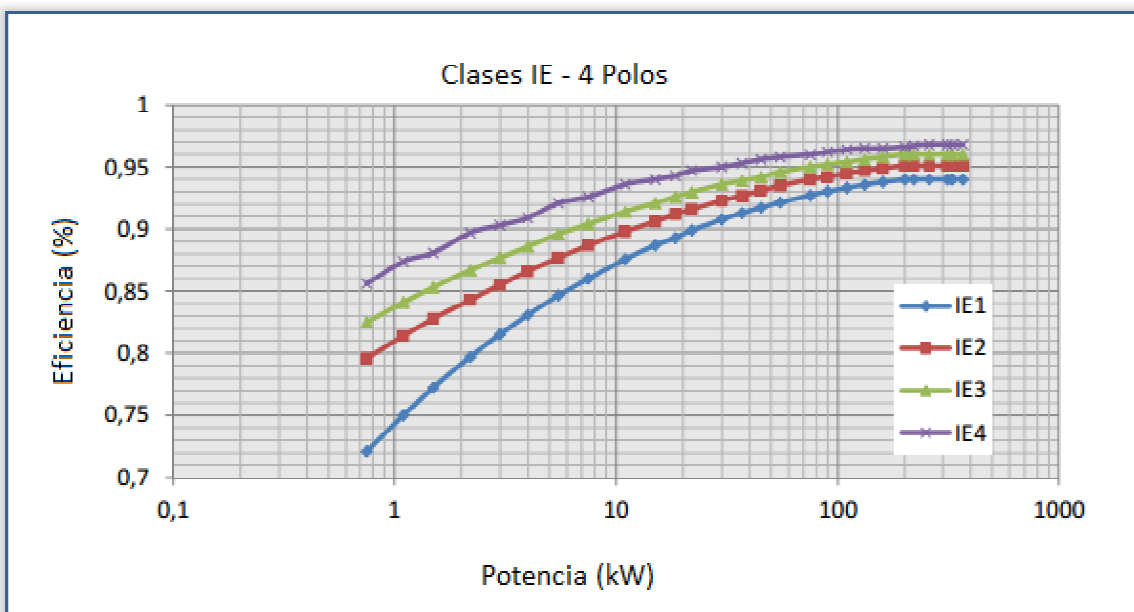
Tabla 1: Tabla de clases de eficiencia definidas por la norma EN 60034-30/ IEC/60034-30 para algunas de las potencias recogidas en ella.

Valores de rendimiento estandarizados para algunas de las potencias recogidas en IEC-EN 60034-31 Nº polos = 4				
Potencia (kW)	IE1 Eficiencia Estándar	IE2 Alta Eficiencia	IE3 Eficiencia Premium	IE4 Eficiencia Súper Premium
0,75	72,1	79,6	82,5	85,6
30	90,7	92,3	93,6	95
110	93,3	94,5	95,4	96,4
250	94	95,1	96	96,7
315	94	95,1	96	96,8
375	94	95,1	96	96,8

Fuente: Eficiencia en Motores, Nuevos desarrollos y tecnologías ABB, "IE4 Super Premium y SIMM IE4"

Este estándar precisa los valores de rendimiento para cada una de las potencias comprendidas entre 0,75 y 375 kW (las cuales abarcan cerca del 70% del total de motores en el mundo) [1], en función de su clase de eficiencia y número de polos (tabla 1).

Figura 48: Clasificación según la norma EN 60034-30/EN 60034-31 de la Comisión Electrotécnica Internacional



Fuente: University of Coimbra, “Electric Motors and Drives”, Product Definition, Standards and Legislation, 2012

En la figura 48 se puede apreciar cómo la diferencia de rendimiento derivada de la elección de una u otra clase de eficiencia para un motor eléctrico es tanto más notable cuanto menor es la potencia del mismo dado que en una máquina eléctrica el rendimiento aumenta a medida que se incrementa la potencia. Esto es debido a que las pérdidas relativas en el hierro producidas por los fenómenos de histéresis y las corrientes de Foucault disminuyen a medida que se incrementa el tamaño de la máquina.

Aunque la tecnología de los motores eléctricos tiene ya una cierta madurez, todavía se esperan algunas futuras mejoras en su rendimiento a través tecnologías como el uso de imanes permanentes, lo cual sería particularmente beneficioso en motores de reducida potencia. A muy largo plazo, se estima que la superconductividad podría reducir aún más las pérdidas, pudiendo llegar a alcanzar rendimientos de 99% aunque el uso de esta tecnología solo sería rentable en motores de gran tamaño con un número muy elevado de horas de trabajo al año. [2]

Hasta las crisis energéticas de los años 70, la mayor parte de los motores se diseñaban y fabricaban para proporcionar la potencia mecánica requerida en su aplicación a unos costes de adquisición razonables, relegando los aspectos de eficiencia energética a un plano secundario. Con la subida de los precios de la electricidad los fabricantes empezaron a promover la mejora de sus motores eléctricos y a definirlos como de eficiencia mejorada aunque sin unos criterios definidos y estandarizados. [5]

El primer acuerdo voluntario en materia de estandarización de eficiencia energética en motores eléctricos fue publicado en 1998 por el "Comité Europeo de Fabricantes de Máquinas Eléctricas y Sistemas Energéticos" (CEMEP) [6] y definió tres clases de eficiencia: Eff3, Eff2, Eff1 (siendo Eff1 el más eficiente). Gracias a esta fórmula fue posible distinguir los motores de alto rendimiento del resto de motores sin clasificar.

El sistema tuvo bastante éxito y se introdujo en una gran cantidad de países en todo el mundo. En Europa la proporción de motores eléctricos de la clase más ineficiente (Eff3) pasó, entre los años 1998 y 2007, de representar un 68% a un 2% del total de los motores instalados [6]. Este sistema de clasificación no garantizó sin embargo la completa definición de las especificaciones técnicas para un mismo nivel de eficiencia, por lo que estas especificaciones en los diferentes países podían diferir entre sí.

Para armonizar los diferentes requisitos técnicos para cada clase de eficiencia en todo el mundo, la IEC publica en 2008 la norma EN 60034-30 definiendo las nuevas clases de eficiencia IE1, IE2, IE3, a las que más tarde se añade la clase IE4, definida en la norma EN 60034-31. Los valores de eficiencia resultantes en este sistema difieren de los obtenidos en la norma anterior (sistema Eff de CEMEP) en la cual se obtuvieron en general valores de eficiencia superiores a los reales debido a que las pérdidas según el método de medición utilizado eran demasiado bajas. [7]

Tabla 2: Equivalencia entre sistemas de clasificación de motores eléctricos

Clase de eficiencia	Internacional	EEUU	UE Antiguo sistema	UE Nuevo sistema	China	Australia
Super Premium	IE4	-	-	-	-	-
Premium	IE3	NEMA Premium	-	IE3	-	-
Alta	IE2	EPA Act	Eff1	IE2	Grade 1	AU2006 MEPS
Estándar	IE1	-	Eff2	IE1	Grade 2	AU2002 MEPS
Inferior al estándar	-	-	Eff3	-	Grade 3	-

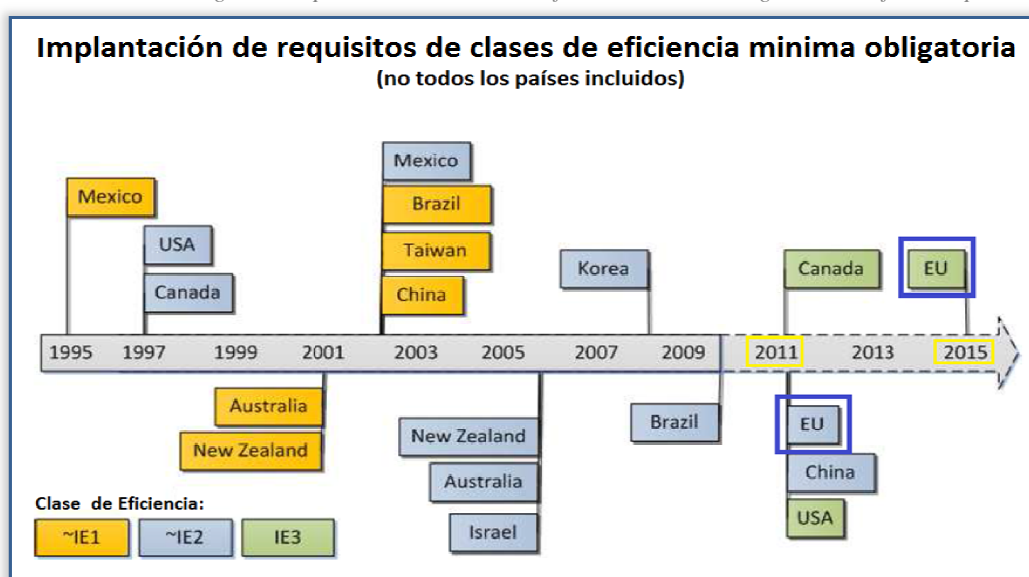
Fuente : IEA, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems ", 2011

Por ello, las antiguas clases Eff1 y Eff2 pese a ser respectivamente equiparables a las actuales IE2 (Alta eficiencia) e IE1 (eficiencia estándar), en una comparación directa para un mismo motor, los niveles de eficiencia determinados de acuerdo con el nuevo método (sistema IE de la IEC) son, en sus especificaciones, hasta un par de puntos porcentuales inferiores a los obtenidos utilizando el método antiguo. [7]

La Unión Europea se rige por el sistema internacional de la IEC. En junio de 2011 fue emitido el **Reglamento de la Comisión Europea (CE) n°640/2009**, por el cual a partir de esta fecha, sólo los motores que cumplan o superen el nivel de eficiencia IE2 pueden ser comercializados e instalados en la UE. En una segunda etapa, a partir de enero 2015, todos los motores entre 7,5 y 375 kW deberán alcanzar el nivel IE3 de eficiencia o bien deberán ser IE2 combinados con variadores de velocidad, y a partir de 2017 esta obligación se extenderá también a los motores entre 0,75 y 5,5 kW. [8]

En la figura 45 se muestra la sucesión de la implantación de normativas para el obligado cumplimiento de requisitos de mínima clase de eficiencia en distintos países (equiparadas al estándar internacional de la IEC).

Figura 49: Línea cronológica de implantación de clases de eficiencia mínima obligatoria en diferentes países



Fuente: UNIDO "Energy efficiency in electric motor systems: Technology, saving potentials and policy options for developing countries"

La Unión Europea ha retrasado la imposición de mínimos requisitos de clase de eficiencia en motores entre 14 y 15 años respecto a países como Estados Unidos, Canadá o México. Esto resulta especialmente llamativo dado el liderazgo europeo en los esfuerzos generales en materia de eficiencia energética mostrado en el análisis de eficiencia energética global llevado a cabo en el capítulo 3.

El ahorro anual resultante de la diferencia de consumo energético que se produce gracias a la sustitución de un motor estándar por otro de alta eficiencia, se determina a través de la siguiente ecuación: [9]

$$\text{Ahorro anual (€/año)} = t_f \cdot P_N \cdot \%P \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{estándar}}} - \frac{1}{\eta_{\text{altaeficiencia}}} \right) \cdot \text{Precio}_{\text{energía}}$$

En la que:

t_f = Tiempo de funcionamiento (horas/año)

P_N = Potencia nominal del motor (kW)

%P = Fracción de plena carga a la que trabaja el motor

$\eta_{\text{estándar}}$ = Rendimiento de un motor estándar

$\eta_{\text{altaeficiencia}}$ = Rendimiento de un motor de alta eficiencia

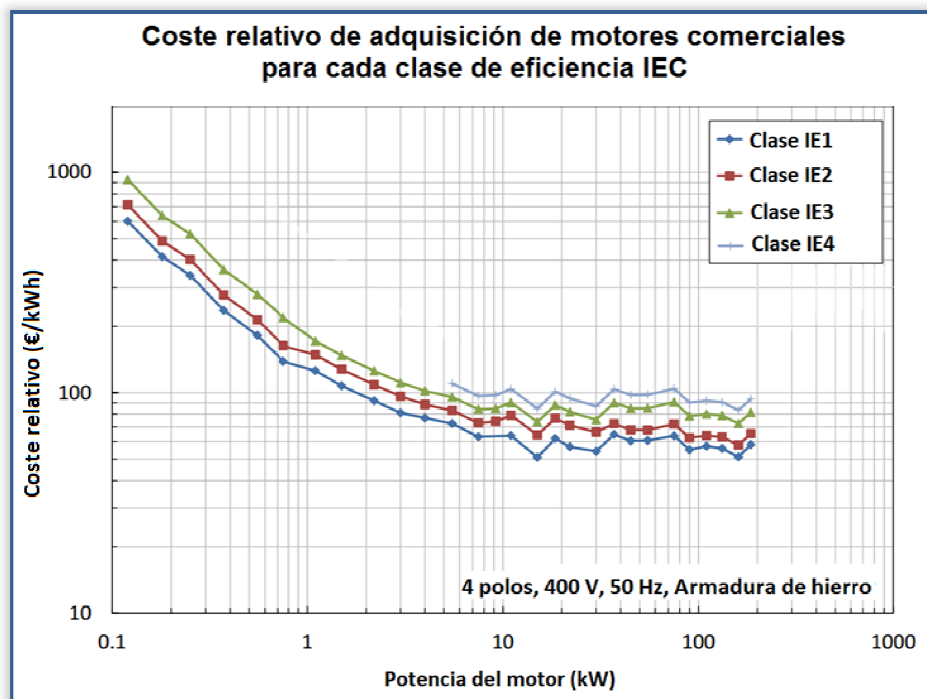
$\text{Precio}_{\text{energía}}$ = Coste de la electricidad (€/kWh)

A continuación se muestra un ejemplo práctico del cálculo este ahorro económico anual según la ecuación anterior, al sustituir un motor clase IE2 por un IE4. En la estimación se considera un motor típico industrial de 315 kW con un funcionamiento de 5000 horas al año a una potencia media de 3/4 de plena carga y un precio de la energía eléctrica para los clientes industriales de 0,07 €/kWh

$$\text{Ahorro anual (€/año)} = 5000 \cdot 315 \cdot \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{1}{0,951} - \frac{1}{0,968} \right) \cdot 0,07 \simeq 1530 \text{ €/año}$$

Una vez calculado el ahorro, se deberá determinar el tiempo de retorno de la inversión. Para ello, es preciso conocer el sobrecoste de la adquisición de un motor de alta eficiencia respecto a uno de eficiencia estándar. La figura 50, muestra los precios estimados para un mismo fabricante en función de la potencia del motor (€/kWh) para cada una de las clases de eficiencia. Se puede observar cómo el coste relativo de la máquina se reduce a medida que aumenta su potencia.

Figura 50: Coste relativo de adquisición de motores según su clase de eficiencia



Fuente: Eemods2013, "Induction Motor Oversizing-Are There Any Benefits?" Dep. Electrical Engineering Polytechnic Institute of Coimbra 2013

Los costes específicos para un motor de 315 kW son de 67 y 95 € respectivamente para las clases IE2 e IE4 (considerando que el coste relativo se mantiene prácticamente invariable con la potencia a partir de los 200 kW). Del producto del coste específico por la potencia se tienen los precios de ambos motores: unos 21.000 € para el IE2 y 30.000 € para el IE4. Esta diferencia de precios queda amortizada en un periodo de 5,9 años, a razón del ahorro calculado de 1530 €/año.

Además del ahorro energético y económico directo fruto de un funcionamiento eficiente, la utilización de motores de alta eficiencia presenta algunas ventajas adicionales como la menor necesidad de mantenimiento debido a la mejora del sistema de refrigeración, la disminución del calentamiento producido en los cojinetes y devanados (con la consiguiente ampliación de los intervalos de lubricación y el aumento de la vida útil del motor) o la menor generación de ruido y los menores esfuerzos mecánicos. [10]

De cara a la sustitución de un motor convencional por otro de alta eficiencia, instalado en un entorno y condiciones geométricas determinadas, las especificaciones de ambos están normalizadas de forma que las dimensiones críticas para la instalación (altura de eje, dimensiones del extremo de eje, distancias entre agujeros de patas, etc) se corresponden independientemente de la clase de eficiencia, por lo que es posible la sustitución directa de uno por otro sin tener que modificar o adaptar el espacio necesario para su operación. [11]

Existen otros aspectos, además de la reducción de las pérdidas inherentes al rendimiento del motor, que pueden resultar incluso más determinantes en su consumo de energía. Uno de ellos es la adecuación del tamaño del motor a la tarea que vaya a desempeñar, evitando sobredimensionarlo mediante la aplicación de coeficientes de seguridad. Muchos motores funcionan continuamente a carga parcial debido a este sobredimensionamiento, operando fuera del punto nominal de trabajo que corresponde con su potencia asignada que se indica en la placa y desarrollando un rendimiento muy inferior al nominal. [1]

El otro factor de gran importancia para la consecución del ahorro energético es la posibilidad de realizar un ajuste de la potencia desarrollada adaptado a cada situación de trabajo del motor, mediante la regulación de la velocidad de operación. Con esta medida se evita que el motor funcione siempre a una velocidad fija sin atender a la demanda real de potencia.

Ejemplos de esta optimización son aplicaciones como un ventilador para la expulsión del CO₂ de un túnel o aparcamiento público en el que la velocidad de funcionamiento tiene que aumentar a medida que se incrementa la concentración, o un agitador industrial de líquidos en el que la velocidad se regula en función de la viscosidad o textura del fluido que puede ser variable durante el proceso.

En sistemas motores que trabajan con fluidos como compresores, ventiladores o bombas, la importancia del ajuste de la velocidad de operación se hace aún mayor dada la relación cúbica existente entre la velocidad y la potencia requerida. Esta relación es conocida como la ley del cubo, la cual pertenece a las leyes de semejanza de la mecánica de fluidos y enuncia que el requerimiento de potencia en una aplicación aumenta con el cubo de la velocidad de giro su eje. [12]

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Esto significa que un pequeño incremento en la velocidad del motor requiere mucha más potencia, pero también se tiene que una pequeña reducción de la velocidad puede producir un gran ahorro de energía.

Dado que las solicitudes de operación en muchos de los sistemas motores en la industria no son constantes en el tiempo, existe un alto potencial de ahorro energético vinculado a la instalación de sistemas de variación de velocidad.

La forma tradicional de mantener el control de los procesos consiste en mantener el motor a plena carga y regular los efectos de este funcionamiento mediante sistemas mecánicos, en lugar de realizar un control del comportamiento del motor. Estos sistemas están compuestos por válvulas, álabes o amortiguadores cuyo funcionamiento está muy alejado de consideraciones de eficiencia energética, ya que se basan en la disipación de la energía sobrante en lugar de en el ahorro o en el no consumo de ésta.[10]

Para abordar la necesidad de adaptar la velocidad de un motor existen tres soluciones posibles: [13]

- Regulación por variación del número de polos: variando el número de polos del estator de la máquina, para lo que es preciso que el rotor sea de jaula de ardilla. Emplea sólo dos escalones de velocidad con lo que presenta el inconveniente de no permitir una regulación continua de ésta.
- Regulación por variación del deslizamiento: la variación del deslizamiento se puede conseguir controlando la tensión aplicada (aunque el par del motor resulta afectado) o introduciendo resistencias en el rotor (presenta grandes pérdidas).
- Regulación por variación de frecuencia: la utilización de variadores de frecuencia electrónicos hace posible la regulación continua de la velocidad, posibilita que esta no sea nunca superior a la necesaria y permite obtener un ahorro energético en todo el campo de regulación.

Un variador de velocidad es un dispositivo electrónico que se conecta entre la red de alimentación y el motor eléctrico con el fin de variar la frecuencia de

alimentación de dicho motor y por consiguiente su velocidad. La variación de velocidad y de frecuencia son proporcionales ya que están ligadas mediante la siguiente expresión:[14]

$$n_s = 60 \cdot f/p$$

Siendo "f" la frecuencia de alimentación, "p" el número de polos y "n_s" la velocidad de sincronismo o de giro del campo magnético la cual, en un motor asíncrono, no es exactamente la velocidad mecánica de rotación debido a la existencia del deslizamiento. El deslizamiento se define como la diferencia relativa entre la velocidad de sincronismo y la velocidad mecánica de rotación. Típicamente los motores presentan valores de deslizamiento reducidos que se sitúan entre un 5 y un 8% [13], siendo de esta forma la velocidad de rotación ligeramente inferior a la de sincronismo.

Debido a esta proporcionalidad entre velocidad y frecuencia puede hablarse indistintamente tanto de variadores o convertidores de velocidad o de frecuencia. De lo anterior se deduce que efectivamente para variar la velocidad de un motor mediante este método, es precisa la variación de su frecuencia de alimentación. Como la frecuencia de la red a la que se conecta el motor es fija (50 o 60 Hz dependiendo de la zona geográfica) será necesaria la utilización de un dispositivo capaz de variar la frecuencia de alimentación: el variador de frecuencia.

Figura 51: Variadores de velocidad



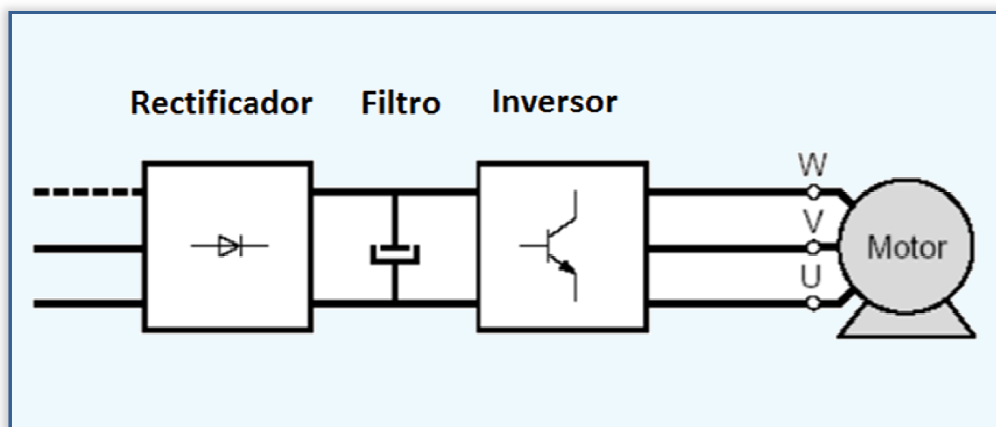
Fuente: Siemens, instrucciones de uso Miromaster 420, edición A2

Los variadores de frecuencia están constituidos por los siguientes componentes: [15]

- **Etapla rectificadora:** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos o tiristores.

- **Etapa de filtrado:** Filtro para suavizar la tensión rectificada. Se usan condensadores y bobinas para reducir la emisión de armónicos y mejorar el factor de potencia.
- **Inversor:** Constituido por elementos de conmutación como transistores IGBT's que convierten la tensión continua en la tensión de frecuencia variable deseada para alimentar al motor.
- **Etapa de control:** controla los IGBT's para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia.

Figura 52: Composición de un variador de velocidad



Fuente: Universidad de León, "Control de variadores"

Los fabricantes poseen diferentes modelos de convertidores concebidos para cada tipo de aplicación cuyas dimensiones variarán en función de la potencia del motor a alimentar. La gama de tamaños existente comprende desde dispositivos instalables en pared a grandes unidades tipo armario: un convertidor de frecuencia de propósito general para alimentación de un motor de 5,5 kW puede caracterizarse por unas dimensiones de 37x12,5x21 cm (altura, anchura, profundidad) y un peso de 6,5 kg, mientras que uno para un motor de 315 kW se caracteriza por unas medidas de 2x0,35x0,6 m y un peso de 230 kg. [16]

Los motores con velocidad ajustable pueden realizar el accionamiento directo de la carga, pudiendo así eliminar componentes para la transmisión de potencia entre elementos mecánicos como las correas o los engranajes, los cuales comportan pérdidas innecesarias. El uso de variadores de velocidad tiene además otras ventajas como la protección contra fallos eléctricos para el motor, la reducción de los daños mecánicos en los arranques y paradas, o la optimización del proceso productivo y la calidad del producto gracias a los amplios intervalos de velocidad, par y potencia. [1][10]

Según la Agencia Internacional de la Energía, el potencial de ahorro energético producto de la utilización de variadores de velocidad en aplicaciones de motores eléctricos se sitúa en términos generales entre un 15% y un 25%. Al mismo tiempo, el ahorro vinculado a la mejora del rendimiento de los motores está, como ya se ha

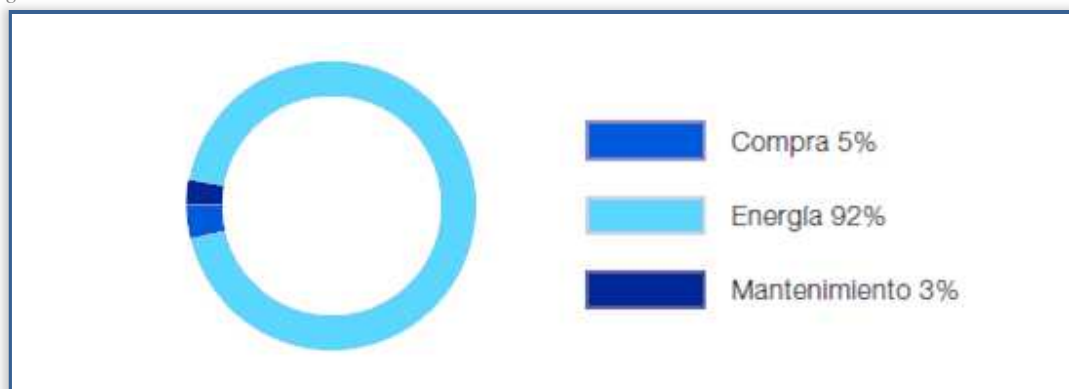
analizado, en torno al 4 y el 5% aunque estos valores varían en función de la potencia del motor en cuestión. De este modo, la unión de ambas optimizaciones ofrece márgenes aproximados de mejora de la eficiencia energética de entre un 20 y un 30%. Se estima también que la completa explotación de este potencial de ahorro a través de la implantación de las mejores tecnologías existentes en la actualidad podría reducir la demanda mundial de electricidad en un 10%. [17]

De forma general los motores eléctricos pueden tener una vida media de unos 20 años [2], por ello, no dar suficiente importancia a los criterios de eficiencia energética en su elección puede implicar una operación ineficiente durante un largo periodo de tiempo cuyos costes asociados podrían haber sido evitados con una elección acertada en el momento de la adquisición.

Un estudio de la "Organización de Desarrollo Industrial de las Naciones Unidas" (UNIDO) estima la recuperación de la inversión para la instalación de motores de alta eficiencia y/o variadores de velocidad en una media de 1,4 años en base al análisis de los resultados de 41 casos prácticos en diversos entornos industriales. En la optimización de estos entornos industriales se realizaron actuaciones como la mejora de las bombas del sistema de agua de refrigeración de una compañía farmacéutica China, la sustitución de los motores ineficientes de una planta de producción de aluminio en la India o la instalación de variadores de velocidad en una industria textil en Estados Unidos. [2]

Por todo ello, a la hora de tomar la decisión de invertir en la compra de un motor de alta eficiencia con convertidor es importante considerar, más allá del precio de adquisición de los equipos, el coste global que estos van a suponer en todo su periodo de servicio, esto es, el Coste del Ciclo de Vida (CCV). Este ciclo comprende tanto el coste de adquisición como de instalación, funcionamiento (coste de la energía), mantenimiento y de eliminación de la maquinaria.

Figura 53: Factores del Coste de Ciclo de Vida de un motor con convertidor



Fuente: ABB, "Convertidores y motores ABB para mejorar la eficiencia energética"

Atendiendo a la evaluación global de los factores que intervienen en el ciclo de vida de los motores eléctricos, los costes de compra de los equipos representan un 5%

[10] del total del gasto que supondrá el sistema motor-convertidor durante todo su ciclo de vida y los costes de mantenimiento un 3% del total.

De estos resultados se desprende que un mayor esfuerzo económico inicial para la adquisición de equipos más eficientes se ve compensado con creces por el ahorro energético y la menor necesidad de mantenimiento derivados de esta elección.

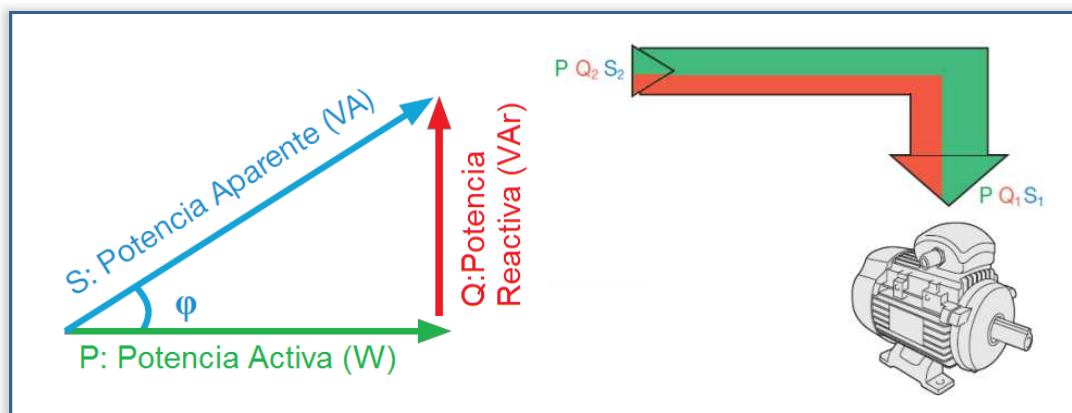
4.2. Compensación de energía reactiva

Los equipos eléctricos implicados en los procesos industriales se alimentan con corriente alterna, muchos de estos receptores eléctricos poseen componentes inductivos o capacitivos (bobinas o condensadores) cuyo funcionamiento se basa en el electromagnetismo, generando sus propios campos magnéticos. Esto da pie a la coexistencia de tres tipos diferentes de potencia:

- **Potencia Activa (P):** representa la potencia útil medida en wattios (W), es decir, la energía que realmente se aprovecha cuando se pone a funcionar un equipo eléctrico y realiza un trabajo.
- **Potencia Reactiva (Q):** es el consumo de potencia no deseado que realiza la máquina, medido en voltiamperios reactivos (VAR). Es consumida junto con la potencia activa (P) por los motores, transformadores y todos los dispositivos o aparatos eléctricos que posean algún tipo de bobina para crear un campo electromagnético. La conexión estas cargas inductivas en una instalación produce un desfase entre las ondas de intensidad y tensión.
- **Potencia Aparente (S):** es la potencia total consumida por la máquina, medida en voltiamperios VA, resulta de la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva.

Estos tres tipos de potencia se pueden relacionar mediante un triángulo de potencias según se ilustra en la figura 54. En este triángulo, el ángulo " φ " formado entre la potencia aparente y la potencia activa define el desfase entre la tensión y la intensidad y su coseno es conocido como factor de potencia, $\cos\varphi$.

Figura 54: Triangulo de potencias / Consumo de potencias en una carga inductiva



Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena, Ing. Organización industrial, "Compensación de Energía Reactiva"

El factor de potencia está por tanto determinado por el tipo de cargas conectadas a la instalación, siendo las cargas resistivas las que tienen un factor de potencia próximo a la unidad. Como ya se ha indicado, al introducir cargas inductivas el factor de potencia varía retrasando la fase de la intensidad respecto a la de la tensión. De este modo, cuanto más bajo sea el factor de potencia (más alejado de la unidad) mayor será la potencia reactiva consumida. En definitiva, el $\cos \phi$ es un indicativo del “rendimiento eléctrico” de una instalación.

Existe por todo lo anterior una gran disparidad en las aportaciones de cada dispositivo eléctrico al consumo de energía reactiva total de una instalación, que depende de la naturaleza inductiva, capacitiva o resistiva de cada uno de ellos. En la tabla 3 se exponen algunos ejemplos de ello:

Tabla 3: Factores de potencia de los elementos industriales más comunes

Factores de potencia algunos de los elementos industriales más comunes			
Dispositivo	$\cos \phi$	Dispositivo	$\cos \phi$
Motor asíncrono	Carga 0% \rightarrow 0,17	Hornos de resistencia	1
	Carga 25% \rightarrow 0,55	Hornos de inducción	0,85
	Carga 50% \rightarrow 0,73	Hornos de calefacción dieléctrica	0,85
	Carga 75% \rightarrow 0,8	Máquinas de soldar por resistencia	0,8-0,9
	Carga 100% \rightarrow 0,85	Centros estáticos de soldadura al arco	0,5
Lámparas incandescentes	1	Grupos rotativos de soldadura al arco	0,7-0,9
Lámparas fluorescentes	0,5	Hornos de arco	0,8
Lámparas de descarga	0,4 - 0,6		

Fuente: Schneider Electric, “Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos”

La presencia de elevadas proporciones de energía reactiva en una instalación produce una serie de efectos negativos y contrarios al ahorro y la eficiencia energética, que hacen precisa su compensación en los puntos de consumo. Estos efectos negativos repercuten tanto al sistema eléctrico como a la instalación a la que se conectan los elementos consumidores.

En el sistema eléctrico estos efectos pueden implicar un incremento de la caída de tensión en las líneas, la disminución de la capacidad de la red eléctrica al tener que transportar una potencia no útil, la necesidad de sobredimensionar las protecciones o sobrecargas en los transformadores de potencia.

En las instalaciones, debido a esta potencia adicional no útil, se pueden producir fluctuaciones de tensión, limitaciones en la disponibilidad de potencia activa (y por tanto la necesidad de contratar más potencia), el incremento de las pérdidas por efecto Joule en los conductores de la instalación, el deterioro de los aislamientos y un encarecimiento de la factura de energía eléctrica por penalizaciones. [18]

En lo relativo a las penalizaciones económicas por energía reactiva, el 31 de diciembre de 2009 se publicaron en el BOE orden ITC 3519/2009 [19] las tarifas eléctricas para el 2010, con una significativa subida de dichas penalizaciones. Estas tarifas son las se siguen aplicando en la actualidad.

Por esta orden, partir de enero de 2010 cualquier empresa con un contrato superior a 15 kW, lo cual incluye prácticamente a cualquier negocio desde una pequeña tienda a una gran industria, es susceptible de sufrir estas penalizaciones. La medida persigue la promoción de la eficiencia energética mediante la penalización económica de los consumos ineficientes. Los distintos cobros se fijan en función del factor de potencia.

Tabla 4: Comparativa de penalizaciones económicas por energía reactiva 2009-2010

Comparativa de penalizaciones económicas por energía reactiva 2009-2010			
Cos φ	€/kVAr (31/12 2009)	€/kVAr (01/01 2010)	Incremento
$\cos\varphi < 0,95$ hasta 0,9	0,000013	0,041554	319.730%
$\cos\varphi < 0,9$ hasta 0,85	0,017018		144%
$\cos\varphi < 0,85$ hasta 0,8	0,034037		22%
$\cos\varphi < 0,8$	0,051056	0,062332	22%

Fuente: BOE, Orden ITC/3519/2009

En la tabla 4 se muestra la magnitud de los aumentos en las penalizaciones por energía reactiva aplicables desde 2010 respecto a los valores anteriores. Resulta especialmente llamativa la subida para el rango de factor de potencia entre 0,9 y 0,95, en el que las penalizaciones económicas por kilovoltiamperio reactivo pasan de ser prácticamente inexistentes a equipararse con el valor de los nuevos cobros por $\cos\varphi$ hasta 0,8, suponiendo un aumento de un 319.730% respecto al año anterior.

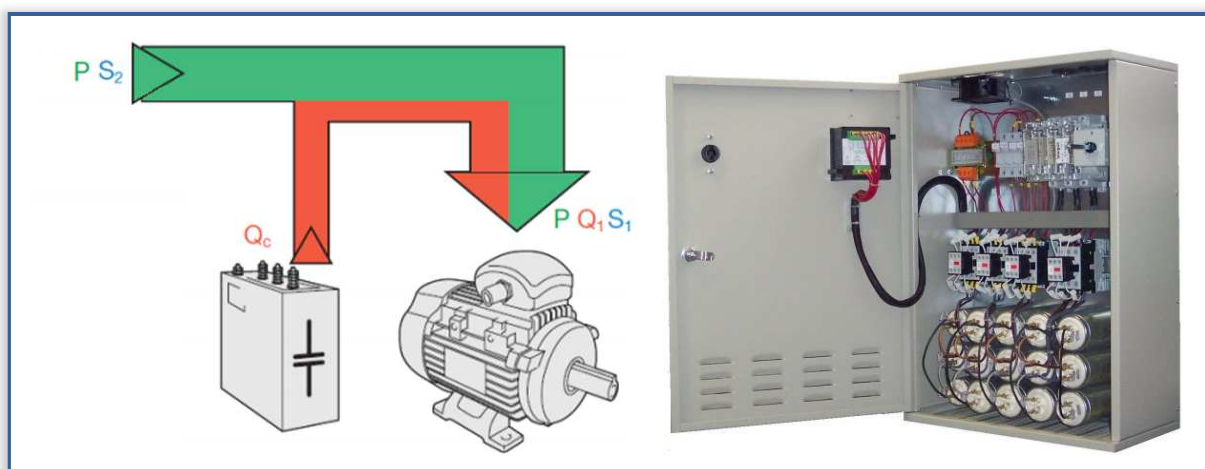
Esta legislación afecta especialmente a los clientes industriales en los cuales, además de producirse un consumo intensivo de electricidad destaca, como ya se ha apuntado, la presencia de receptores altamente inductivos como motores, transformadores, hornos o lámparas fluorescentes.

La compensación de la energía reactiva se realiza mediante la instalación de condensadores. Estos generan energía reactiva de sentido inverso al consumido por la instalación y neutralizan su efecto ya que, de igual forma que en los receptores inductivos la corriente atrasa su fase respecto a la tensión, en los receptores capacitivos (condensadores) este fenómeno se realiza al revés, adelantando su fase respecto a la tensión. Esto puede considerarse como una energía reactiva capacitiva, que se opone o contrarresta a la inductiva.

La compensación de reactiva puede ser fija ó variable. En la compensación fija se suministra a la instalación de manera constante la misma potencia reactiva, por lo que debe utilizarse para compensar instalaciones que presenten una demanda invariable de potencia reactiva.

En la compensación variable se suministra la potencia reactiva según las necesidades puntuales de la instalación. Es indicada para casos en los que los diferentes elementos consumidores no tengan un régimen permanente de funcionamiento (las luminarias se encienden y apagan, los compresores de climatización funcionan en función de la temperatura o los procesos productivos se realizan por etapas) y por tanto la potencia reactiva a compensar tenga fluctuaciones. [20]

Figura 55: Potencias en una carga inductiva con compensación / Batería automática de condensadores



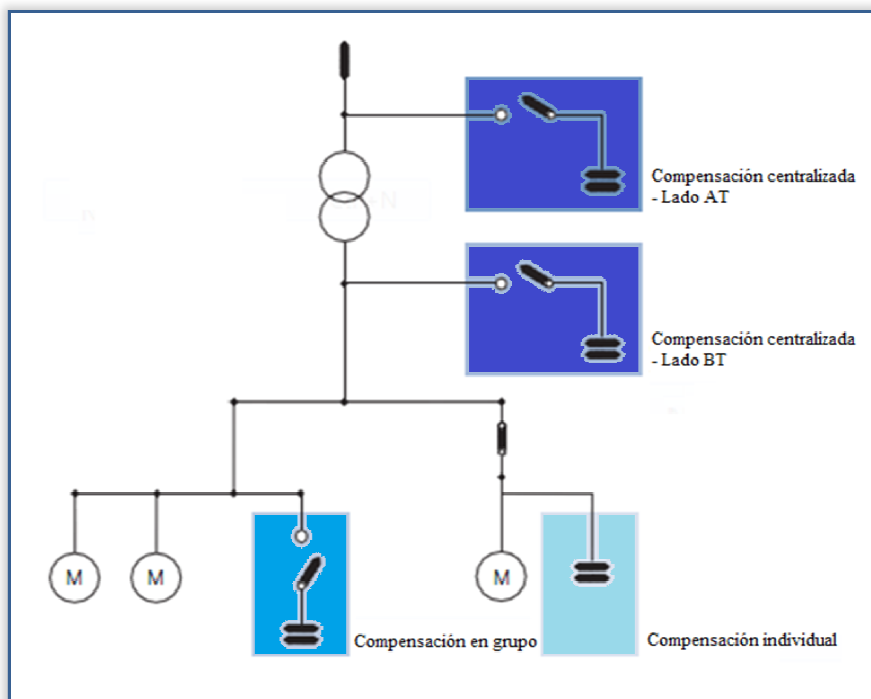
Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena, Ing. Organización industrial, "Compensación de Energía Reactiva" / Batería de condensadores (7,5 a 120 kVAr) - Serie BCC

Para conseguir la compensación variable se utilizan baterías automáticas de condensadores, las cuales están formadas por diversos condensadores de diferentes capacidades dispuestos en paralelo y conectados entre sí (figura 55). Estas baterías automáticas se adaptan a cada situación midiendo de forma constante la potencia reactiva presente en la instalación y ordenando, por medio de un microprocesador, la conexión de los condensadores en mayor o menor número según la capacidad necesaria calculada para alcanzar el factor de potencia deseado. [19]

Configuraciones para la compensación de energía reactiva

En función del punto de la instalación en el que se instalen los equipos de compensación existen tres configuraciones posibles: individual, en grupo y centralizada.

Figura 56: Diferentes configuraciones para compensación de energía reactiva



Fuente: ABB, "ABBACUS Metal Enclosed Capacitor Bank"

Compensación individual

En esta disposición se utiliza la compensación fija aplicada en equipos que tienen un ciclo continuo de operación y cuyo consumo de reactiva es considerable (principalmente motores eléctricos o transformadores). El condensador se instala en cada una de las cargas de forma que los únicos conductores afectados por la energía reactiva son los que unen la carga con el condensador.

Gracias a esta configuración la energía reactiva queda confinada entre el condensador y la carga, quedando el resto de las líneas de la instalación libres de ella, dado que ésta se abastece en el mismo lugar de consumo. Además, los condensadores entran en servicio sólo cuando la carga está conectada ya que el arrancador puede servir como interruptor del condensador de forma que no son necesarios otros sistemas de regulación. [18][21]

Como inconveniente tiene que el coste de adquisición e instalación de varios condensadores por separado es superior al de uno de mayor tamaño equivalente. Asimismo, en cargas que no son usadas con frecuencia, los condensadores puedan estar infrutilizados.

Compensación en grupo

Esta configuración es recomendable cuando un grupo de cargas, ya sean iguales o diferentes, se conectan simultáneamente y demandan una cantidad de reactiva constante (compensación fija). En el caso de que las cargas sean motores, los condensadores se instalarían en el centro de control de motores, pudiendo compensar desde este punto la reactiva de todos ellos.

En esta solución, la inversión económica es menor que en la compensación individual ya que no es necesario instalar un condensador para cada una de las cargas. Se elimina la potencia reactiva de todas las líneas de la instalación, salvo el tramo entre las cargas y el centro de control de motores. [18][21]

Compensación centralizada

La potencia total de la batería de condensadores se instala en la acometida, en el lado de alta o baja del transformador. Se utiliza la compensación variable para que, como ya se ha descrito anteriormente, la batería automática de condensadores conecte o desconecte en cada momento la capacidad necesaria según el consumo de reactiva instantáneo de la instalación.

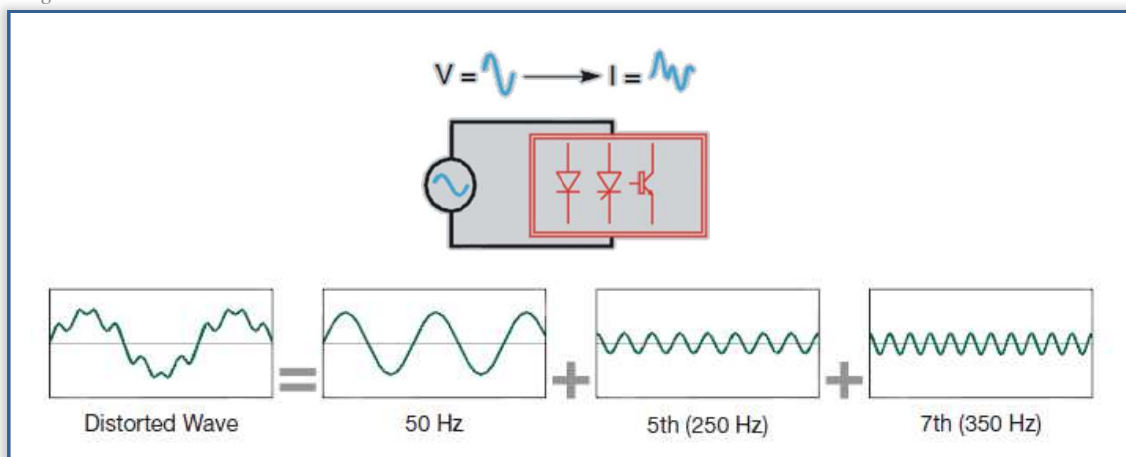
Constituye la alternativa más económica ya que toda la instalación de compensación se concentra en un solo punto. La desventaja de corregir el factor de potencia con una configuración centralizada es que aguas abajo, las líneas de la instalación entre la acometida y las cargas no quedan descargadas de potencia reactiva. [18][21]

4.3. Filtrado de armónicos

Cuando en una instalación existe una potencia importante de aparatos electrónicos se producen distorsiones en la forma de onda de la intensidad debido a los armónicos introducidas por estos aparatos en la red. Esto es debido a que estos dispositivos constituyen cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con una tensión senoidal, absorben una intensidad no senoidal. [22]

Antes del uso masivo de la electrónica de potencia, los efectos de los armónicos no eran tenidos en cuenta ya que generalmente eran poco importantes. Pero tras la aparición e integración de gran cantidad de dispositivos electrónicos en las instalaciones industriales fue preciso considerar su magnitud y tratar de reducir o eliminar sus consecuencias puesto que las deformaciones que producen en las ondas de intensidad o tensión pueden perturbar la distribución eléctrica y disminuir la calidad de energía.

Figura 57: Armónicos



ABB, ABBACUS Metal Enclosed Capacitor Bank / Schneider Electric, "Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos", Capítulo 5.

La tensión armónica es definida por la norma UNE EN 50160:1999 como "una tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación". La magnitud de la distorsión puede ser evaluada a través de la tasa de distorsión armónica total (THD), que expresa en porcentaje la suma del valor eficaz de los componentes armónicos hasta el orden considerado respecto al valor eficaz de la componente fundamental.

Con tasas de THD para la onda de tensión de entre un 5 y un 8% los efectos de los armónicos son significativos pudiéndose producir funcionamientos anómalos en los equipos, mientras que para tasas superiores al 8% la distorsión armónica es considerada importante siendo muy probables las anomalías y requiriéndose medidas de actuación. Para la onda de corriente, un valor entre el 10 y el 50% es considerable y puede implicar

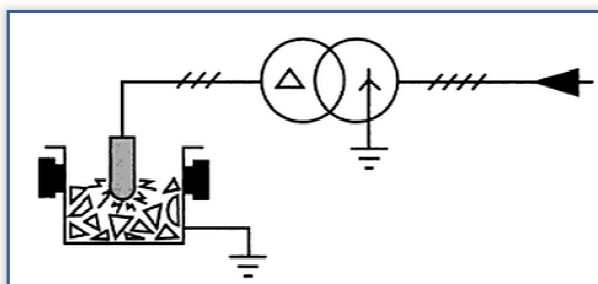
el sobredimensionado de los cables o en su defecto que estos puedan trabajar en condiciones de sobrecarga, y para una tasa superior al 50% se precisan medidas correctivas urgentes. [23]

Como ya se ha indicado, las cargas no lineales más comunes están constituidas por elementos de electrónica de potencia tales como variadores de velocidad, rectificadores o convertidores, aunque también es destacable la inyección de armónicos por parte de cargas como reactancias saturables, equipos de soldadura u hornos de arco. El resto de cargas (inductivas, capacitivas o resistivas) presentan un comportamiento lineal y no generan armónicos. [22]

En el caso particular de la industria siderúrgica, (que es objeto de estudio en el presente TFG) la presencia del horno de arco puede producir grandes perturbaciones en el sistema eléctrico relacionadas con la inyección de armónicos por parte de esta carga.

El horno de arco se utiliza principalmente para la obtención de acero a partir de la fundición de chatarra férrea. Su funcionamiento se basa en la transformación de energía eléctrica en térmica a través de la creación de un arco eléctrico que se establece entre los electrodos o entre los electrodos y la carga en un medio gaseoso ionizado. Con ello que se consiguen temperaturas muy elevadas para fundir el metal.

Figura 58: Horno de arco eléctrico



Fuente: Universidad de Cantabria, "Armónicos en Sistemas de Potencia", 1994.

La distancia entre los electrodos y la chatarra no permanece constante a lo largo del proceso por lo que la longitud del arco varía. Esto provoca grandes fluctuaciones en la tensión y corriente consumidas por el horno de arco dando lugar a una elevada presencia de armónicos, desequilibrios y otros fenómenos. Esto convierte al horno de arco en una fuente armónica de gran capacidad concentrada en un único punto de la instalación cuyos efectos en el sistema eléctrico pueden ser muy perjudiciales en caso de no actuar sobre ellos. [24]

En general los armónicos afectan a equipos como condensadores de compensación de reactiva, motores o transformadores, causando en ellos pérdidas adicionales, sobrecargas y calentamientos que hacen que sufran un envejecimiento prematuro. En estos equipos se pueden producir asimismo vibraciones, desgaste mecánico o molestias acústicas.

Otros elementos como los interruptores automáticos pueden sufrir disparos intempestivos debidos a la superación de los valores de cresta de la corriente. En los conductores se producen mayores pérdidas y calentamientos, mientras en los sistemas de control pueden producirse pérdidas de datos o alteraciones funcionales. [22]

El impacto económico derivado de las perturbaciones tiene que ver con la necesidad de sustituir los equipos debido a su envejecimiento prematuro, el sobredimensionado de la instalación, el aumento de la potencia contratada para afrontar las sobrecargas o la paralización de los equipos de producción debida a disparos intempestivos de los interruptores.

La solución más común para la eliminación o atenuación de los efectos producidos por los armónicos es la utilización de filtros. Estos, según la tecnología que utilizan para su reducción o eliminación, se pueden clasificar en pasivos, activos o híbridos.

Los filtros **pasivos** se componen de elementos como bobinas y condensadores configurados como circuitos resonantes sintonizados a las frecuencias de los armónicos que se quiere eliminar. Este tipo de filtro se dispone en paralelo a la carga no lineal de manera que trabaja como una derivación que absorbe los armónicos evitando que circulen por la instalación.

Son indicados para instalaciones en las que también se requiere la corrección del factor de potencia. Tienen como inconvenientes que solo pueden ser sintonizados para la compensación de un determinado orden armónico y que al estar diseñados para su efectividad en presencia de unas cargas determinadas, la modificación de las cargas de la instalación podría afectar a su funcionamiento. [23]

Los filtros **activos** se caracterizan por posibilitar el filtrado de un amplio rango de frecuencias armónicas debido a su funcionamiento dinámico y adaptado a cualquier tipo de carga. Su funcionamiento se basa en la medida de la corriente total presente en el sistema eléctrico, la determinación de la componente fundamental de esta corriente, y la inyección a la red de la fase opuesta de la componente armónica en la magnitud precisa para que ésta quede cancelada. [25]

Los filtros **híbridos** combinan las dos tecnologías anteriores en un único dispositivo, combinando las ventajas de ambas y proporcionando un buen comportamiento en un amplio rango de potencias.

4.4. Iluminación

Resulta imposible concebir la actividad industrial sin la utilización de la iluminación artificial. La calidad de la iluminación presente en los entornos industriales de trabajo es un factor muy determinante en la calidad del mismo, al mismo tiempo que contribuye al confort y la calidad visual de los trabajadores e influye positivamente en su productividad, su actitud y su implicación. La adecuación de la iluminación a las diferentes tareas o procesos que se realizan en cada zona de la planta tiene también un gran impacto en las condiciones de seguridad con las que se trabaja.

Para conseguir una iluminación de calidad que garantice estos beneficios al mínimo coste será preciso hacer un estudio que analice las tecnologías instaladas y el consumo del sistema de iluminación existente. Esto hace posible determinar los potenciales de ahorro derivados de la implantación de un sistema más eficiente que proporcione las mismas o mejores prestaciones con un menor consumo.

En la valoración costes-beneficios de un nuevo sistema, se deberán tener en cuenta los costes de adquisición de las nuevas lámparas (elemento emisor de luz) y luminarias (estructura que soporta la lámpara), los costes de su remplazo e instalación, el futuro ahorro energético y los costes de mantenimiento.

En el diseño de un sistema de iluminación eficiente se deberán tener en cuenta las necesidades reales de iluminación respecto a las existentes, centrándose en la ya mencionada adecuación de la cantidad y calidad de iluminación a la exigencia de la tarea visual desempeñada en cada situación en base a los requisitos especificados por la normativa europea de iluminación en espacios de trabajo interiores EN 12464-1:2002.[26]

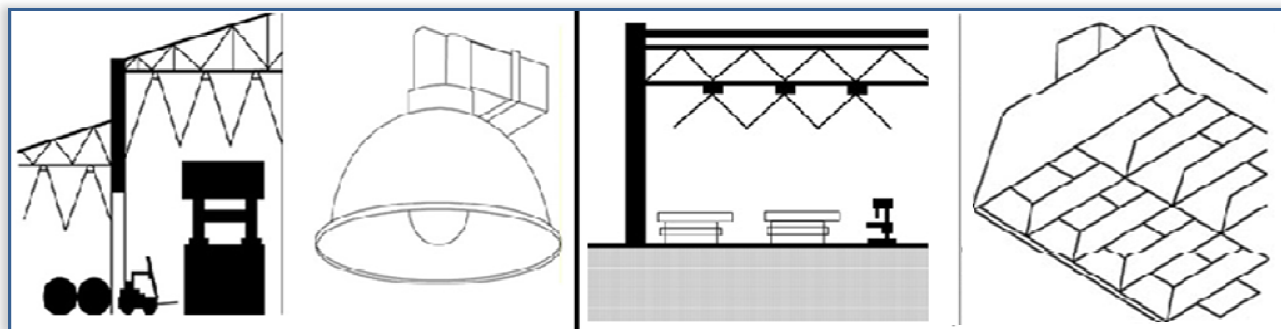
Una vez determinadas las condiciones lumínicas requeridas (intensidad, brillo, color, uniformidad, orientación) se deberá determinar el equipo de alumbrado capaz de suministrar esta luz de la forma más eficiente así como su óptima distribución y posicionamiento. La instalación de sistemas de control de la iluminación o el óptimo aprovechamiento de la luz natural también puede resultar muy beneficiosa para la reducción del consumo.

Los tipos de lámparas más empleadas en los entornos industriales son los fluorescentes tubulares, las lámparas de vapor de mercurio, las lámparas de halogenuros metálicos y las lámparas de descarga de vapor de sodio. [27]

La elección del tipo de lámpara y luminaria depende de las dimensiones del entorno en el que vayan a ser instaladas. En zonas de techos altos (mayores a 7 metros) tradicionalmente se utilizan luminarias en forma campana de con lámparas de descarga

de alta potencia de vapor de mercurio o haluro metálico. Esto se correspondería con zonas reservadas para tareas pesadas como almacenaje o tránsito de cargas. En ellas se busca la superposición de los haces de luz para obtener una buena iluminación en el plano vertical.

Figura 59: Lámparas y luminarias según la altura

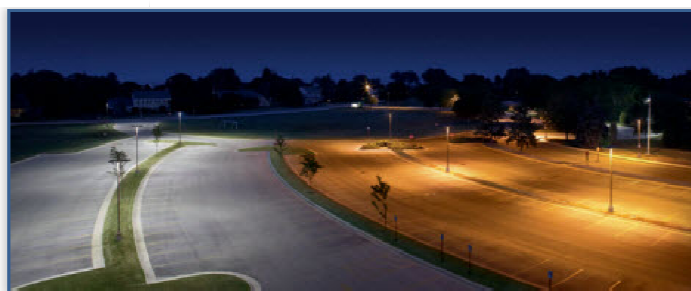


Fuente: Gas Natural Fenosa, empresa eficiente, “Iluminación industrial”

En zonas de techos bajos (menos de 4 metros) o intermedios (de 4 a 7 metros) lo más habitual es la utilización de tubos fluorescentes. Estas estancias se corresponderían con oficinas o zonas de trabajo. En ellas se desea una iluminación adecuada en el plano horizontal para lo que pueden encontrarse distintas disposiciones como paneles cuadrados o líneas de tubos montados o suspendidos en el techo. [27]

La utilización de la tecnología LED presenta grandes ventajas energéticas respecto al resto de lámparas industriales anteriormente mencionadas dado que su eficacia lumínica (relación lúmenes/watio) es superior al de estas, a excepción de las de vapor de sodio, las cuales presentan valores de eficacia lumínica incluso superiores a los LED aunque no están especialmente indicadas para iluminación de interiores, pues el color de la luz que emiten es demasiado cálido (figura 60).

Figura 60: Iluminación LED frente a iluminación con lámparas de vapor de sodio



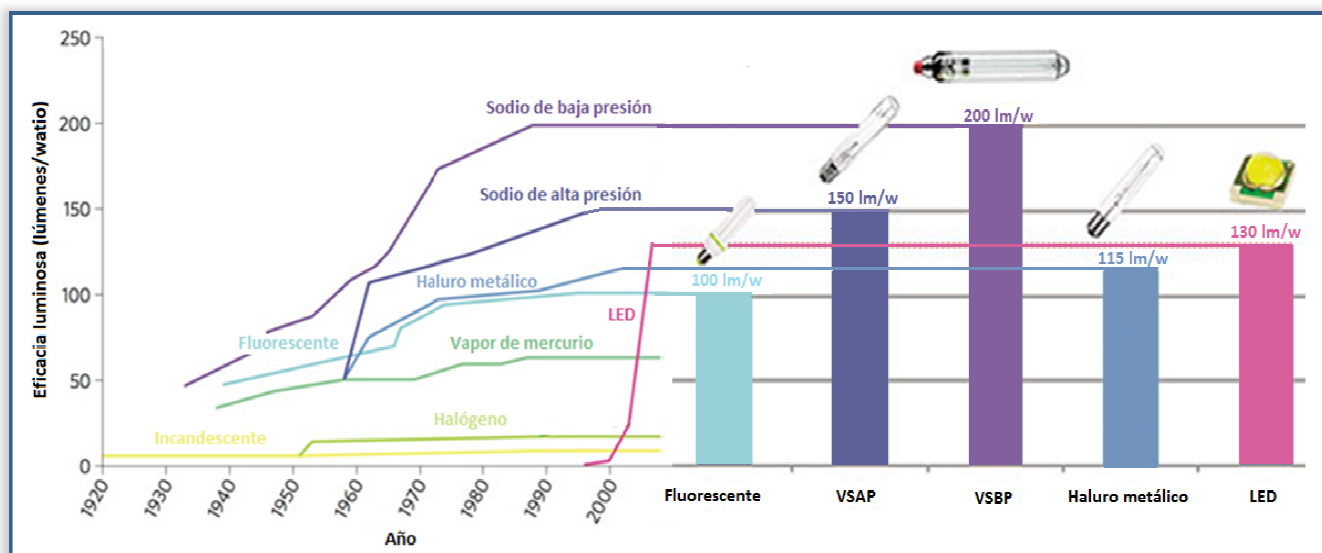
Fuente: My LED lightning guide “LED versus Traditional Lamps: A fight between unequals”

Un LED o diodo emisor de luz (Light Emiting Diode) es un componente electrónico semiconductor, que emite luz al paso de la corriente eléctrica. Su uso comenzó como pequeños indicadores en los equipos electrónicos o electrodomésticos, más tarde fueron utilizados en elementos de iluminación como pequeños proyectores de

luz o linternas. Su rápida evolución ha conducido a que hoy en día puedan aplicarse para prácticamente cualquier necesidad de iluminación tanto urbana, como doméstica o industrial.

En la figura 61 se muestra la evolución de la eficacia lumínica de cada tecnología de iluminación en función de su madurez. En la actualidad, los LED presentan una eficacia de en torno a 130 lm/w frente a los 115 de las lámparas de haluro metálico, los 100 de los fluorescentes o los 60 del vapor de mercurio.

Figura 61: Eficacia lumínica de cada tipo de lámpara



Fuente: Elaboración propia: Digi-Key Corporation "What's Next for High-Power LEDs" Steven Keeping, 2012 / Lumínica, "Tecnología LED en alumbrado vial posibilidades de regulación" 2012

Las ventajas del uso de la tecnología LED no son sólo relativas al ahorro energético, sino que también pueden conducir a considerables ahorros económicos en el mantenimiento del sistema de iluminación dado que tienen un tiempo de vida aproximado superior a las 50.000 horas, frente a las 8.000 de las lámparas fluorescentes, las 12.000 de las de haluro de metal, las 16.000-24.000 de una de vapor de mercurio y las 16.000 y 28.000 de las de sodio de baja y alta presión respectivamente. [28] [27]

Por todo lo anterior, en los últimos años ha aflorado un gran número de empresas de servicios energéticos que basan su negocio en la sustitución de los sistemas de iluminación tradicionales por tecnología LED, remplazando las campanas de haluro o vapor de mercurio por campanas LED y los tubos fluorescentes por tubos LED.

Figura 62: Campana y tubo LED



Fuente: United, Catálogo de luminarias

Como ya se ha mencionado, se pueden obtener importantes beneficios de la regulación y control del sistema de iluminación. Esto implica la instalación de dispositivos capaces de activar, desactivar o graduar la intensidad de la luz en cada situación o actividad desarrollada en función de parámetros físicos o temporales.

Algunos de los elementos que integran estos sistemas de control son los temporizadores, los detectores de movimiento y presencia, los reóstatos para regular la intensidad lumínica o los sensores fotosensibles para la regulación por luz natural.

Los temporizadores funcionan en base a consignas horarias o de calendario, por lo que son especialmente indicados para instalaciones en las que existe un patrón periódico definido en función de los horarios de trabajo, los tiempos de descanso, los días de la semana o la franja horaria en la que se desarrolla cada tipo de actividad de forma que si esta cambia, lo haga también la iluminación. Los detectores de presencia tienen un gran potencial para el ahorro energético en zonas de paso o de cortas estancias.

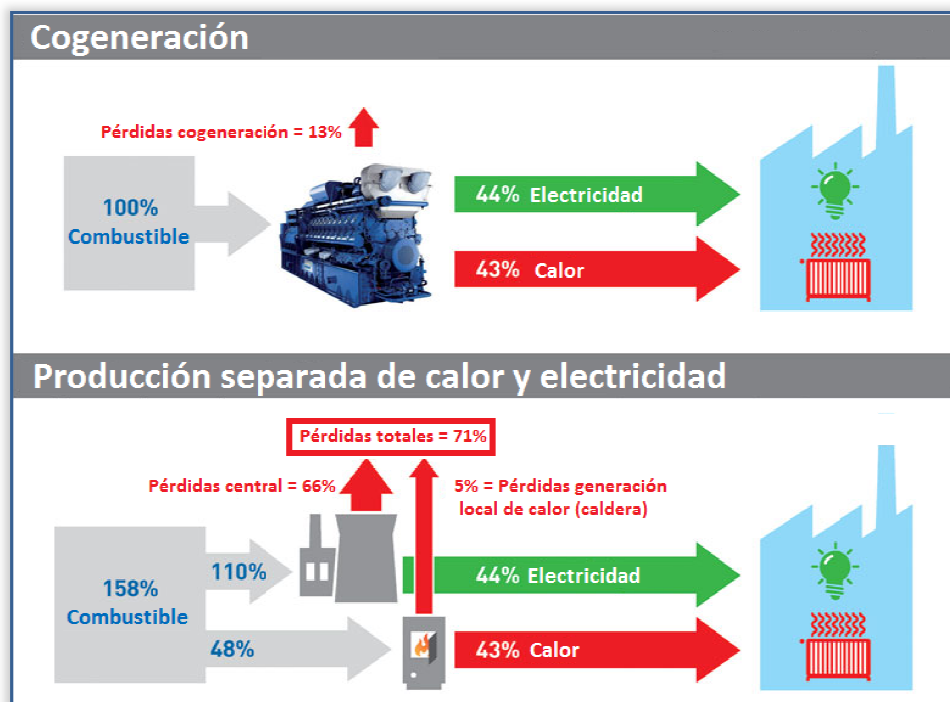
Un detector fotoeléctrico deberá mantener la máxima coordinación entre las condiciones de luz natural y las consecuentes necesidades de alumbrado artificial, evitando consumos energéticos innecesarios.

4.5. Cogeneración

La cogeneración se define como la producción conjunta y simultánea de dos energías secundarias (energía eléctrica y energía térmica) a partir de un único combustible o energía primaria. Gracias a ello, se aprovecha gran parte de la energía térmica que de otro modo se disiparía a la atmosfera evitando así tener que generar esa energía a través de otro sistema.

En la generación convencional las dos energías secundarias se producen por separado, es decir, por un lado se produce vapor o agua caliente en calderas o estufas dentro de la propia fábrica y por otro se adquiere la electricidad a través de una compañía eléctrica. La producción conjunta en un sistema de cogeneración hace que el rendimiento global sea más elevado (figura 63).

Figura 63: Cogeneración frente a producción separada de calor y electricidad



Fuente: MWM, competencias, decentralized energy supply, cogeneration-trigeneration plants

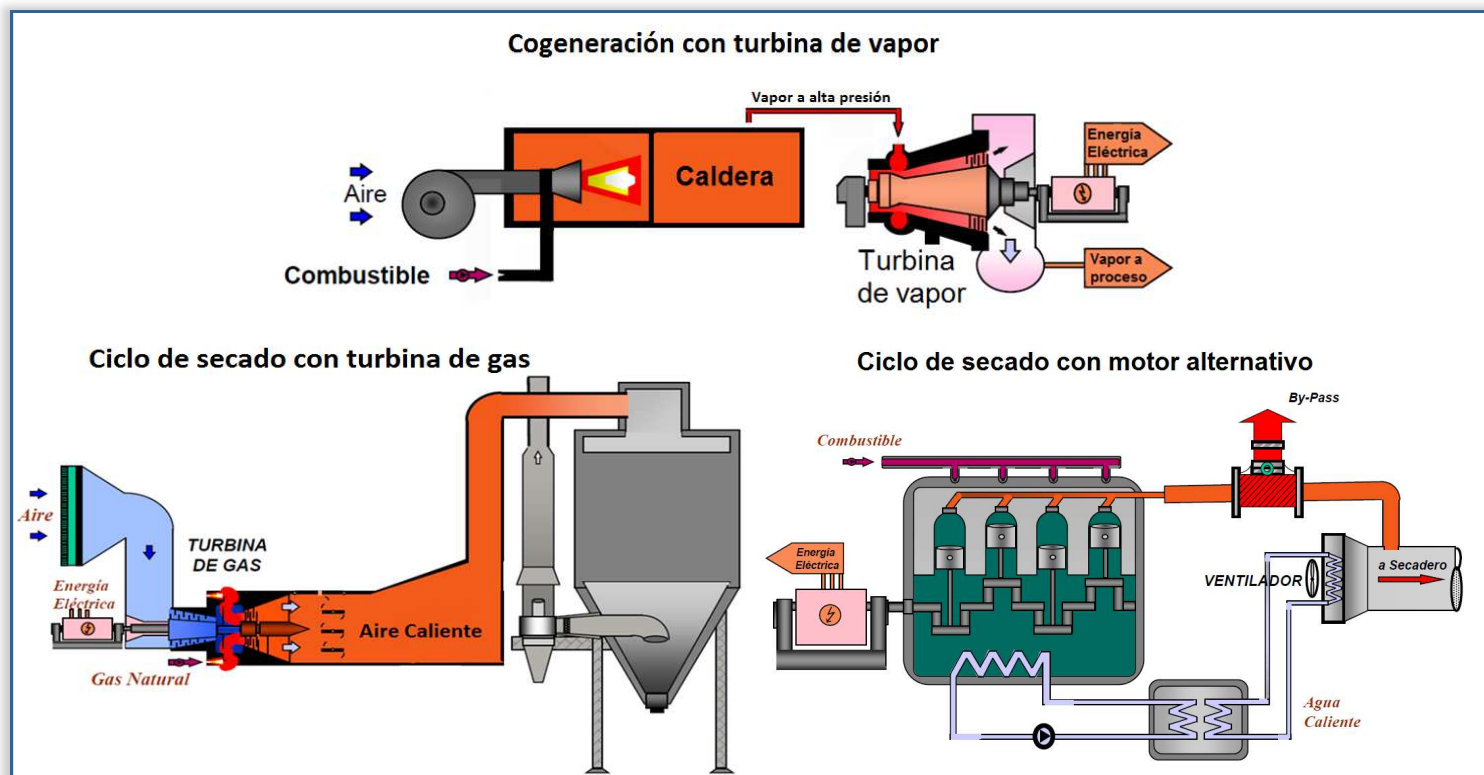
La instalación de cogeneración deberá estar por definición siempre vinculada a la existencia de una demanda energía térmica, la cual puede ser entregada al proceso de consumo en forma de agua caliente, fluidos térmicos, vapor o gases calientes. Los sistemas de cogeneración están especialmente indicados en plantas que presentan demandas simultáneas y continuas de calor y electricidad con buena disponibilidad de fuentes primarias de combustible.

La base de la cogeneración es el aprovechamiento de la energía calorífica, de modo que la referencia para el dimensionamiento de las plantas es la demanda de calor que en la situación previa debe generarse de forma independiente. Conocido este consumo térmico se podrá seleccionar el sistema de cogeneración más adecuado para cada caso y el tamaño de éste, teniendo en cuenta factores como el nivel de temperatura requerido o el fluido caloportador más indicado. [29]

En España la cogeneración esta en el marco legal del Régimen Especial según el RD 661/2007. De acuerdo a esto, las plantas con cogeneración tienen la posibilidad de incorporar a la red la totalidad o parte la energía eléctrica generada (siempre y cuando lo hagan en las condiciones técnicas y de calidad adecuadas), teniendo derecho a percibir por ello una retribución económica estipulada en el ya mencionado decreto [30]. La condición de Régimen Especial es aplicable tanto a la cogeneración como a las instalaciones renovables de producción eléctrica siempre que la potencia de las instalaciones sea menor o igual a 50 MW. [31]

En función del entorno de instalación y de la aplicación para la que va a ser utilizada la cogeneración, ésta puede estar basada en distintas tecnologías: cogeneración con motor alternativo, cogeneración con turbina de gas, cogeneración con turbina de vapor, o cogeneración de ciclo combinado. En la figura 64 se muestran algunos ejemplos de las configuraciones posibles.

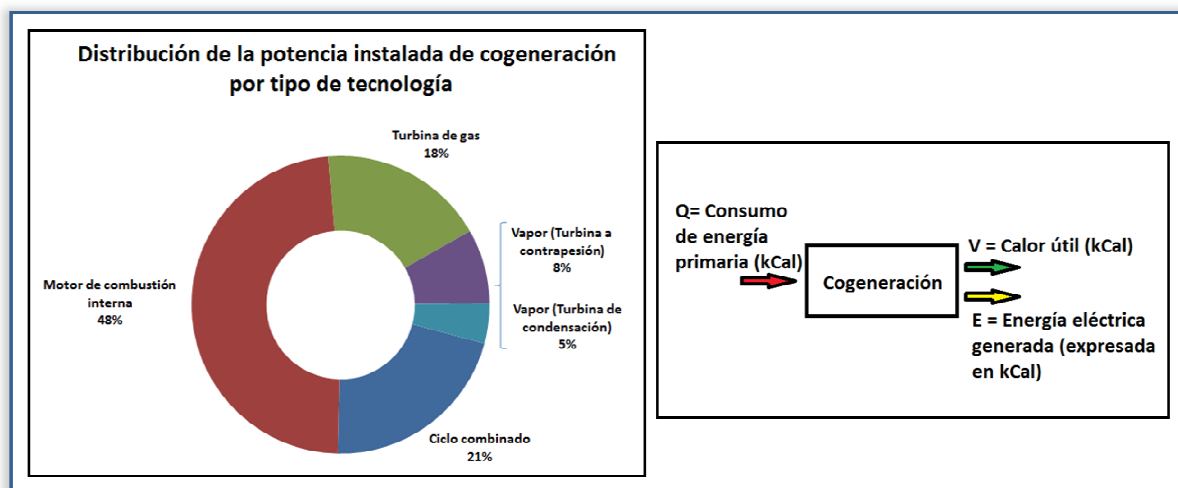
Figura 64: Ejemplos de sistemas de cogeneración



Fuente: Gas Natural Fenosa, Empresa eficiente, Plantas de cogeneración, Componentes

Los combustibles empleados pueden ser el gas natural, el fueloil, la biomasa o el gas refinería, siendo el primero de ellos el más común ya que es utilizado en aproximadamente el 80% de la generación de energía por cogeneración en España. [32] La tecnología de cogeneración más utilizada en España es el motor de combustión interna presente en prácticamente la mitad de las instalaciones, seguida por el ciclo combinado y la turbina de gas (figura 65).

Figura 65: Distribución de cogeneración por tipo de tecnología / Flujos energéticos en la cogeneración



Fuente: IDAE, Boletín de estadísticas energéticas de cogeneración, año 2011 / Elaboración propia

Todas las plantas de cogeneración tienen el propósito de ahorrar en el consumo de combustible pero la magnitud de este ahorro puede ser muy variable en función del sistema de cogeneración, el tamaño o el diseño de la instalación. Por ello, la calidad del diseño de una instalación no se determina en base al ahorro de energía primaria en valor absoluto sino en base a índices de eficiencia. Los más representativos son: [29]

- **Rendimiento global (RG):** expresa la relación entre la producción conjunta de energía eléctrica y calor respecto al combustible empleado para ello.

$$RG = \frac{E + V}{Q}$$

- **Rendimiento eléctrico equivalente (REE):** es el rendimiento eléctrico comparable con el de una central convencional de generación eléctrica.

$$REE = \frac{E}{Q - Q_{aprovechada}} = \frac{E}{Q - \frac{V}{Ref V_{\eta}}}$$

Ref V_{η} : valor de eficiencia de referencia para producción separada de calor

- **Ahorro de energía primaria (PES):** es el porcentaje de ahorro de energía primaria usando cogeneración respecto a la energía primaria que se hubiera consumido en generación separada de calor y electricidad. Se utiliza para determinar cuándo la cogeneración es de alta eficiencia.

$$PES = 1 - \frac{Q}{\frac{V}{Ref V_{\eta}} + \frac{E}{Ref E_{\eta}}}$$

Ref E_{η} : valor de eficiencia de referencia para producción separada de electricidad

La cogeneración es considerada de alta eficiencia para aquellas plantas de potencia igual o superior a 1MW que obtengan como mínimo un ahorro porcentual de energía primaria (PES) de un 10%, y para las de potencia inferior a 1MW que presenten algún ahorro de energía primaria ($PES > 0\%$). [29]

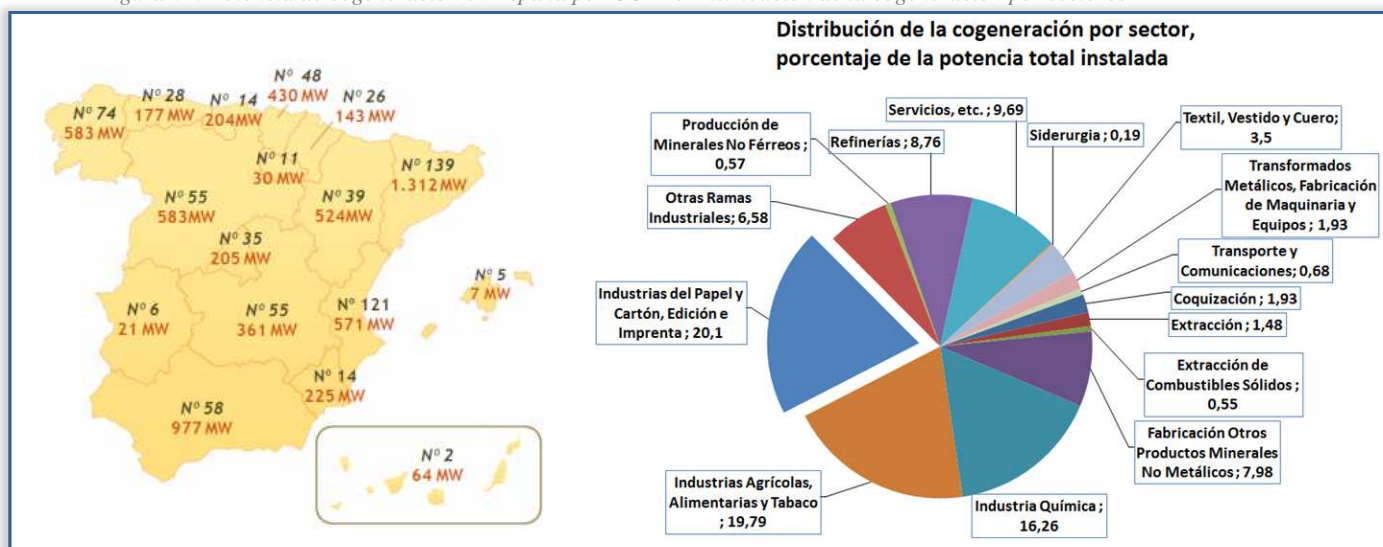
La utilización de cogeneración presenta numerosas ventajas tanto para el sistema energético del país, como para el sistema eléctrico o para las propias plantas con cogeneración. Para el sistema energético implica una reducción del consumo de energía primaria (y por tanto una disminución de la dependencia energética exterior), una mayor diversificación energética y una reducción del grado de impacto medioambiental.

El sistema eléctrico ve reducidas las pérdidas en el transporte de la energía debido al modelo de generación distribuida frente a la generación centralizada, lo que a su vez contribuye a la mejora de la estabilidad del sistema. Se evita asimismo la inversión adicional en líneas de transporte y distribución de mayor capacidad así como la puesta en funcionamiento de las centrales menos eficientes.

Las plantas con sistemas de cogeneración se benefician de ahorros económicos gracias al ahorro de energía primaria, la compensación económica por la generación de electricidad y la posibilidad de autoabastecer su demanda eléctrica. Esto conduce a una mayor garantía y fiabilidad de suministro y en definitiva a una mejora de su competitividad. [33] [34]

En la actualidad la cogeneración produce más del 12% de la electricidad consumida en España con una potencia instalada de unos 6400 MW, concentrándose la mayoría en Cataluña y Andalucía. Aunque los sistemas de cogeneración son responsables del 22% del consumo nacional de gas natural, su utilización conlleva una disminución de un 2% de las importaciones de energía primaria ya que, de no existir cogeneración, la demanda térmica a la que abastecen seguiría teniendo lugar y siendo cubierta de forma energéticamente ineficiente. [32] [34]

Figura 66: Potencia de cogeneración en España por CCAA / Distribución de la cogeneración por sectores



Fuente: IDAE, Boletín de estadísticas energéticas de cogeneración, año 2011 / Elaboración propia

En la distribución sectorial de la potencia total instalada de cogeneración (figura 66), entre las industrias objeto de estudio del presente TFG, destaca la industria del papel la cual es, con un peso aproximado del 20% del total, la que cuenta con una mayor potencia instalada (junto con la industria alimentaria). Las industrias metalúrgica y siderúrgica suponen tan sólo un 0,57 y un 0,19% del total de la cogeneración instalada respectivamente. A las industrias del papel y alimentaria les siguen en importancia la industria química (16%), el sector servicios (9,7%) y las refinerías (8,7%).

La elevada presencia de sistemas cogeneración en la industria del papel se debe a que ésta presenta, como se verá en el capítulo 5, unas condiciones idóneas para su integración. Por ello, el grado de penetración de la cogeneración en los grupos productores de papel en España supera el 70%, sumando en 2013 una potencia eléctrica instalada de unos 1100 MW cuyos excedentes eléctricos inyectados a la red suponen un 2,5% de la generación total nacional. Este sector representa por tanto un ejemplo del éxito en la integración de los sistemas de cogeneración para la mejora de la eficiencia energética, el cuidado medioambiental y la competitividad industrial. [36]

La instalación de nueva potencia de cogeneración en el sector del papel en España ha seguido, al igual que el total de la cogeneración, un crecimiento bastante moderado en los últimos años.

Tabla 5: Evolución de la potencia de cogeneración instalada en la industria del papel

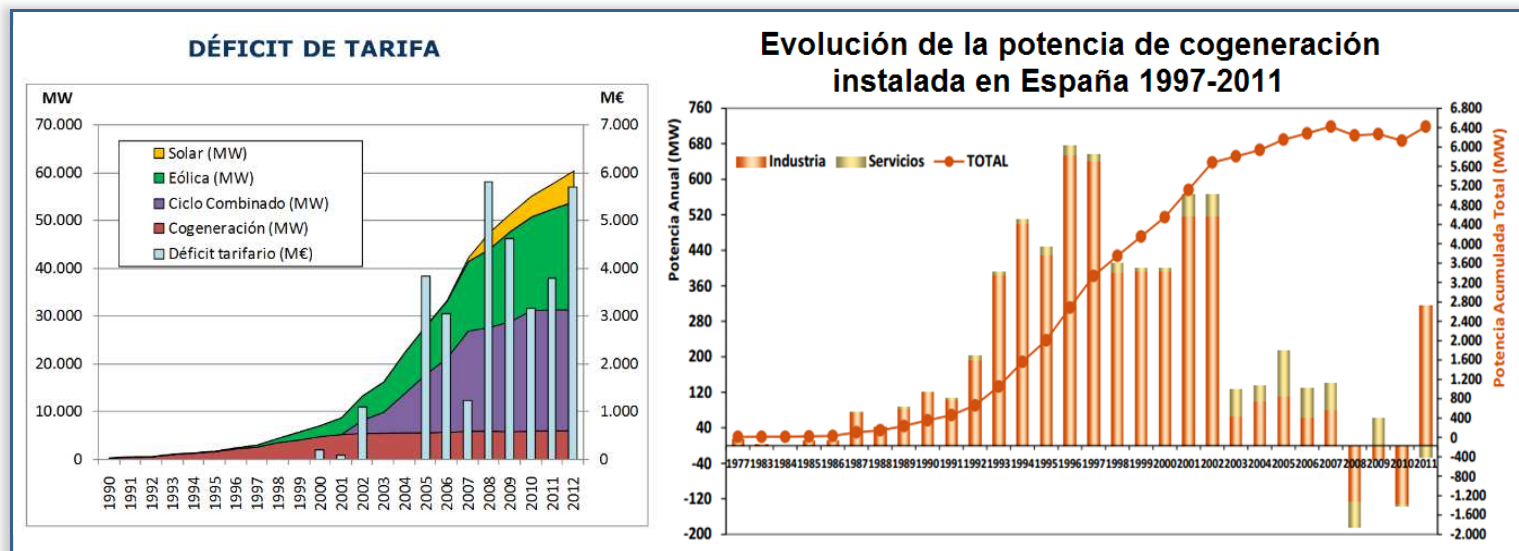
	Cogeneración instalada en la industria del papel				
	1991	1996	2001	2005	2011
Potencia instalada (MW)	264	428	960	1.060	1.135

Fuente: Acogen, "Cogeneración en la Industria Papelera", Marzo 2013

En la planta productora de papel de "Unión Industrial Papelera S.A" localizada en La Pobla del Claramunt se realizó la puesta en marcha en el año 2009 de un ciclo combinado alimentado de gas natural en la turbina y biogás en la postcombustión. El ciclo combinado consta de una turbina de gas de 28MW, una turbina de vapor a contrapresión de 3,9MW y una turbina de vapor de condensación de 1,7 MW. Con ello esta planta papelera obtiene un rendimiento global (RG) del 82,2%, un rendimiento eléctrico equivalente (REE) del 75,2% y un ahorro de energía primaria (PES) del 20,1%. [37]

Pese al alto número de ventajas derivadas del uso de la cogeneración ya mencionadas, el desarrollo de esta tecnología en España en la última década no ha sido superior a los 500 MW, lo que resulta llamativo teniendo en cuenta los hechos de que (como se puede apreciar en el gráfico de la izquierda de la figura 67) su presencia no ha contribuido a la creación del actual déficit tarifario y que incluso en la actualidad sigue existiendo un gran potencial inexplorado para la instalación de nuevos sistemas.

Figura 67: Déficit de tarifa / Evolución de la potencia instalada de cogeneración 1997-2011



Fuente: COGEN España, "Petición y justificaciones Reforma Energética COGEN España"/ IDAE, Boletín de estadísticas energéticas de cogeneración, año 2011

Este potencial para la instalación de nuevos sistemas se detalla en la tabla 6, en la cual se muestra la situación de la cogeneración en el año 2004 según datos publicados por el IDAE. De acuerdo a estos datos, el potencial disponible para la instalación de sistemas de cogeneración hace una década en el sector industrial era de un 46% pese a ser con diferencia el sector que ya presentaba la mayor capacidad instalada.

Esta situación no difiere en gran medida de la actual dado que la potencia total instalada en 2004 era de unos 6200 MW frente a los actuales 6400 MW. Por ello se puede afirmar que aún sigue habiendo un alto potencial para la mejora de la eficiencia energética en la industria a través de la explotación de esta disponibilidad. [35]

Tabla 6: Cifras de la cogeneración por sectores en 2004

	Situación de la cogeneración en España en 2004			
	Potencial tecnológico (MW)	Potencia instalada (MW)	Grado de penetración	Grado de disponibilidad
Industria	9.393	5.048	54%	46%
Refino	1.430	577	40%	60%
Doméstico y comercial	6.414	175	3%	97%
Tratamiento de residuos	2.084	412	20%	80%
TOTAL	19.321	6.212	32%	68%

Fuente: IDAE, "Análisis del potencial de cogeneración de alta eficiencia en España 2010-2015-2020"

Para fomentar la instalación de nuevas plantas de cogeneración en actividades industriales, el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 en las "medidas en el sector transformación de la energía", especifica una serie de actuaciones institucionales.

Estas actuaciones se dirigen a los propietarios de las instalaciones industriales susceptibles de instalar sistemas cogeneración que todavía no los emplean, destacando aquellas ramas en las que se dan las mejores condiciones técnicas para ello o aquellas en las que el grado de penetración aun es bajo. Estas ramas son: "alimentación, bebidas y tabaco", "química", "refino de petróleo", "papel y cartón", "minerales no metálicos", "textil, cuero y calzado" e "industria farmacéutica". Las cifras más reseñables al respecto se muestran en la siguiente tabla: [31]

Tabla 7: Cifras relativas a la instalación de nuevos sistemas de cogeneración en la industria (Plan 2011-2020)

	Plan 2011-2020: Cifras relativas a la instalación de nuevos sistemas de cogeneración en instalaciones industriales				
	2008	2009	2010	2016	2020
Potencia nueva instalada en industria base 2011 (MW)	-	-	-	1.723	2.608
Ahorro de energía primaria base 2007 (ktep)	17,4	44,6	55,2	703	1.036

Fuente: Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020

Otro aspecto importante para aprovechar el mayor potencial de eficiencia energética posible en el ámbito de la cogeneración es la modernización o sustitución de los sistemas considerados antiguos, es decir, aquellos con 15 ó más años. Estos sistemas representan en el año 2014 unos 4000 MW, que se convertirán en 5800 MW para el año 2020.

El Plan 11-20 en su "medida para modificación sustancial de cogeneraciones existentes" establece unos mecanismos para realizar las modificaciones necesarias en los sistemas de cogeneración anticuados, proyectando para periodo 2011-2020 la modernización del parque instalado para una potencia de 3925 MW consiguiendo con ello un ahorro de energía primaria (base 2007) de 268,6 ktep. [31]

Para el periodo 2011-2020 de duración del plan, éste proyecta la instalación de una nueva potencia de cogeneración de 2.490 MW y 3.751 MW para los años 2016 y 2020 respectivamente. Pese a ello, estas cifras deberán revisarse debido a la sobrecapacidad de potencia eléctrica instalada que existe actualmente en España, que hace innecesaria la instalación de nueva potencia, incluso aunque ésta se base en el aprovechamiento de una energía térmica que se va a seguir consumiendo de igual forma.

Capítulo 5. Industria del papel

Figura 68: Industria del papel



Fuente: Praxair, Industries Overview, Pulp and paper

El papel está constituido por un entramado de fibras de celulosa de origen vegetal al que se añaden diversas sustancias químicas para la modificación de sus propiedades y calidad. Antes de convertirse en papel, estas fibras vegetales deben ser tratadas, refinadas y posteriormente sometidas a procesos como el blanqueo, el tamizado o el secado.

La materia prima más importante para la obtención de la fibra vegetal es la madera (utilizada en cerca del 90% de la producción de papel a partir de fibra virgen), aunque la fibra también puede ser obtenida a partir de otros vegetales como la paja, el cáñamo, el algodón, el bambú o el bagazo de caña de azúcar. [1]

Las maderas más empleadas son las provenientes de coníferas de especies de hoja caduca, siendo los abetos y los pinos los más utilizados en Europa [2]. La madera obtenida de los bosques presenta dos partes claramente diferenciadas, estas son: una parte exterior de corteza (no deseable para la producción de papel) y una parte interior en la que se encuentran las fibras de celulosa que será preciso extraer.

La separación de la corteza se puede realizar de forma hidráulica con chorros de agua a alta presión o de forma mecánica mediante herramientas de corte o mediante el rozamiento de unos troncos con otros. [3] La madera en estado natural se compone de alrededor de un 50% de agua y un 50% de fracción sólida, la cual se divide en un 45% de celulosa, un 25% de hemicelulosa², un 25% de lignina³ y un 5% de aceites, resinas y otras sustancias. [4]

³ La lignina es una sustancia polimérica tridimensional presente en la madera compuesta por ácidos, alcoholes fenilprópicos y azúcares. Proporciona rigidez a la madera actuando como puente de unión entre sus células. [5]

² Sustancia gomosa intermediaria en la composición química entre los azúcares y la celulosa. Es abundante en las paredes de las plantas, entremezclada con la celulosa y la lignina. [6]

Existe una amplia gama de productos finales de la industria del papel cuyas propiedades y método de fabricación varían en función del uso para el que vayan a estar destinados. Estos productos finales van desde el cartón corrugado, las cartulinas, las bolsas o sacos para envoltorios comerciales o alimenticios, el papel de escritorio, el papel de prensa o el papel de seda (tisú), hasta los papeles especiales fotográficos o para impresión.

Entre las principales propiedades que caracterizan un producto de papel frente a otro se encuentran: la rigidez, la resistencia, la capacidad de absorción, la blancura, el brillo, la opacidad, el espesor o el gramaje⁴.

5.1. Proceso de producción del papel

5.1.1. Producción de la pulpa o pasta de papel

Para la separación de la celulosa contenida en la madera es necesaria la liberación de sus fibras de la acción aglutinante de la lignina. Esto es conocido como el proceso de obtención de la pulpa, el cual puede llevarse a cabo de forma química o mecánica.

Aunque en la mayoría de los casos la pulpa o pasta de papel se obtiene a partir de la fibra virgen, ésta también puede ser obtenida a partir de fibra recuperada o reciclada sometida a procesos de desintegración, destintado y blanqueo.

Las plantas de producción de papel pueden ser integradas o no integradas en función de si combinan la producción de pasta con la posterior producción de papel o si por el contrario se limitan a la venta de la pasta producida o bien a su compra para la exclusiva transformación de ésta en papel. [8]

Como ya se ha mencionado, la obtención de la pulpa se puede llevar a cabo mediante métodos químicos o mecánicos, siendo los químicos los utilizados en el 90% de la producción mundial (a partir de fibra virgen) frente al 10% que utiliza métodos mecánicos.[4] A continuación se describen los principales aspectos de los distintos métodos junto con sus respectivos procesos de blanqueo.

⁴ El gramaje es la magnitud que representa la densidad superficial de un producto de papel expresada en g/m² [7]

Métodos químicos

Los métodos químicos para la obtención de la pulpa de papel se basan en la extracción de la lignina mediante la disolución de ésta en un proceso de cocción en una solución de sustancias químicas denominada "licor blanco". Estas sustancias disuelven químicamente la lignina dispuesta entre las fibras de la madera que ha sido previamente reducida a astillas en la serrería. El recipiente en el que se realiza la cocción es conocido como digestor.

El proceso químico de separación elimina muchos de los componentes no fibrosos de la madera, lo cual reduce el rendimiento (la proporción de la cantidad inicial de madera que puede ser transformada en pulpa) a cerca de un 50%. [3] Los métodos químicos se dividen en el método Kraft (o del sulfato) y el método del sulfito, de los cuales el primero es el más importante ya que, (para el 90% de la producción mundial que corresponde a los métodos químicos) representa el 80% mientras que el método del sulfito tiene un peso del 10%. [4]

Proceso de producción de pasta Kraft

El proceso de producción Kraft da lugar a una pasta fuerte marrón oscura que se obtiene mediante la cocción de las astillas de madera en un licor blanco compuesto por hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) en un proceso que se mantiene a unos 170 °C durante 3 o 4 horas. [3] La mezcla resultante se filtra y se espesa para reducir su contenido de agua y extraer los fluidos residuales de la cocción, ("licor negro") los cuales son concentrados para su utilización como combustible para la producción de calor en el propio proceso.

Después del proceso de cocción en el digestor, la pasta aún no es apta para la producción de papel ya que presenta un alto contenido de lignina residual que ha de ser eliminada en los procesos de deslignificación con oxígeno y blanqueo para evitar que se perjudique la calidad de la fibra y que se produzca decoloración marrón en el papel final.

El proceso de deslignificación con oxígeno es una etapa intermedia de eliminación de lignina entre la cocción y el blanqueo, que permite reducir la necesidad de agentes químicos en la posterior etapa de blanqueo a la vez que disminuye el contenido en lignina desde un 3-5% hasta aproximadamente un 1,5%. El proceso se lleva a cabo en un recipiente a presión en un medio alcalino en el que se trata la pasta de papel con oxígeno a una temperatura de unos 100 °C agregando sales de magnesio (MgSO₄) para mantener la resistencia de la pasta. [4][9]

A pesar de la eliminación de la lignina producida en los procesos de cocción y deslignificación, ésta aún no ha sido completamente eliminada para la obtención de celulosa pura, por lo que resulta necesaria una etapa de blanqueo. El blanqueo requiere activos muy selectivos para la eliminación de esta lignina residual siendo el cloro el más eficaz de ellos. Pese a su eficacia, el gas cloro (Cl₂) dejó de utilizarse para el blanqueo

en la década de los 90 debido a los problemas medioambientales ocasionados por la producción de sustancias organocloradas altamente contaminantes originadas por la reacción del cloro con los compuestos orgánicos presentes en la pulpa. [1]

Los métodos alternativos actualmente utilizados son el método EFC (libre de cloro elemental) que utiliza dióxido de cloro (Cl_2O) o el método TCF (totalmente libre de cloro) en el que se suprime por completo el uso de compuestos clorados por la utilización de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), oxígeno, ozono (O_3) y enzimas. [3][1]

Tras el proceso de blanqueo se lleva a cabo un proceso de preparación de la pasta en función de las características del producto final de papel deseado. A partir de este punto comienza la fabricación del papel, común para todos los métodos de obtención de la pasta, que será descrito posteriormente.

La pasta Kraft suele transformarse en productos para escritorio de alta calidad, libros o bolsas para comestibles.[3] La fabricación de una tonelada de pasta Kraft consume de 10 a 14 GJ de energía térmica y unos 500-800 kWh de energía eléctrica. La mayor parte de la energía térmica se consume en la vaporización de agua y en el calentamiento de fluidos mientras que más del 50% de la energía eléctrica es utilizada en aplicaciones de bombeo. [4]

Pese a estos altos requerimientos energéticos, las modernas plantas de pasta Kraft no integradas son energéticamente autosuficientes debido a la recuperación energética que se produce al usar el "licor negro" o la corteza como combustibles o a la presencia de sistemas de cogeneración.

Proceso de producción de pasta al sulfito

En el proceso del sulfito se obtiene una pasta más clara, débil y suave que en el proceso Kraft, siguiendo un proceso muy similar al de éste salvo que se utiliza sulfito de magnesio (MgSO_3) como reactivo en el "licor blanco" y el proceso de cocción se extiende a entre 6 y 8 horas a una temperatura de en torno a 130°C. [3][8]

Debido a su menor contenido inicial en lignina, la pasta al sulfito es generalmente más fácil de blanquear que la pasta Kraft de forma que en el método del sulfito rara vez se lleva a cabo el proceso intermedio de deslignificación con oxígeno.

El consumo energético en una planta de pasta al sulfito no integrada es de 16 a 18 GJ de energía térmica y 700-800 kWh de energía eléctrica por tonelada de pasta producida; valores ligeramente superiores a los de una planta Kraft. [4]

Métodos mecánicos

En los métodos mecánicos la separación de las fibras se lleva a cabo mediante la aplicación de energía mecánica, presionando los troncos descortezados contra una muela cerámica giratoria que desgarrar y tritura la madera mientras se añade agua para refrigerar y reblandecer, produciendo astillas.

Posteriormente, tras el cribado de la arena y otros residuos sólidos, las astillas pasan a la refinadora de pasta mecánica: una máquina en la cual son reducidas a haces o fragmentos de fibra por medio de dos discos metálicos ranurados en contra-rotación.

El deterioro de las fibras debido a su trituración en la muela giratoria y en la refinadora hace que la resistencia de la pasta mecánica sea menor que la de la pasta química. La utilización del método mecánico no disuelve la lignina sino que la ablanda y separa las fibras mecánicamente por lo que ésta sigue estando presente en la pasta. Gracias a ello, mucho material no celulósico permanece en la pasta resultando rendimientos superiores al 85% en la transformación de madera a pasta, lo que lo convierte en un método muy eficaz. [3]

Por los motivos anteriores, la calidad de la pasta mecánica resulta inferior a la de la pasta química de modo que se utiliza en productos como papel para prensa o papel tisú, y sus fibras pueden ser recicladas tan sólo entre 3 y 4 veces frente a las 5-10 veces que es posible reciclar las fibras obtenidas mediante el método químico. [2]

Existen variantes del método mecánico como el proceso termomecánico (TMP) que incluye la utilización de vapor de agua para reblandecer las astillas antes y durante el proceso de refinado, o el proceso químico-termomecánico (CTMP) que combina la utilización de vapor de agua con la adición de sustancias químicas para un mayor reblandecimiento y disolución parcial de la lignina, lo que produce una pasta especialmente resistente ideal para la producción de cartones corrugados.

En el método mecánico, el proceso de blanqueo no consiste en la eliminación de la lignina sino en la modificación de sus grupos cromóforos⁵ a una forma incolora utilizando para ello agentes como ditionito sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) o peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Este efecto no es permanente ya que con el paso del tiempo y el efecto de la luz el papel se amarillea no siendo recomendable para la producción de papel de archivo sino preferiblemente para productos de un solo uso. [4]

La energía consumida por tonelada de pasta depende del tipo de proceso mecánico utilizado, siendo de 1100 a 2200 kWh para el puramente mecánico, de 1800-3600 kWh para el termomecánico y de 1000 a 4300 kWh en el químico-termomecánico. [4]

⁵ Grupo químico de un compuesto orgánico responsable de la absorción selectiva de la luz y por tanto el que le confiere un color determinado.

Recuperación/Reciclaje de la fibra

El método del reciclaje se basa en el aprovechamiento de la fibra contenida en el papel originalmente obtenido mediante procesos químicos o mecánicos. La recuperación de la fibra es una técnica que se ha desarrollado y ha aumentado en gran medida en las últimas décadas debido a sus beneficios económicos, energéticos y ecológicos.

El tratamiento de las fibras recicladas puede consistir en procesos de limpieza exclusivamente mecánica (sin productos para el destintado) o en procesos con limpieza mecánica y destintado. Los primeros se suelen emplear para la fabricación de papel ondulado o cartón mientras que los segundos están dirigidos a productos como papel tisú, papel prensa o papel para revistas.

El primer paso para la obtención de pulpa a partir de papel reciclado consiste en la desintegración de éste para la liberación de sus fibras. Esto se lleva a cabo en un desintegrador en el que se introduce el papel junto con agua caliente aplicando agitación mecánica e hidráulica, pudiendo incluirse la adición de reactivos como el hidróxido de sodio (NaOH) para facilitar el proceso.[4]

Una vez obtenida la pasta se procede a la separación de las impurezas sólidas como pueden ser arena, plásticos o grapas mediante su tamizado, la aplicación de fuerzas centrífugas o por diferencia de densidades.

La pasta reciclada es posteriormente sometida a los procesos de destintado y blanqueo (si la calidad del producto final así lo requiere) siendo este último similar al utilizado en los métodos químicos.

El proceso de destintado consiste en la aplicación de aire comprimido desde el fondo hasta la superficie de un recipiente en el que la pasta en flotación libera su tinta al adherirse ésta a las burbujas producidas, concentrándose en la superficie en forma de espuma que es retirada. [2]

El consumo energético por tonelada de pasta de papel reciclado se sitúa en unos 12 GJ cuando se incluye el proceso de destintado y en unos 10 GJ cuando este proceso no se lleva a cabo. [4]

5.1.2. Proceso de fabricación del papel

Los procesos para la transformación de pasta en papel son los mismos con independencia del método utilizado para la producción de la pasta.

El primer paso para la fabricación de la lámina de papel es la preparación de la pasta. La preparación consiste en: la mezcla de distintos tipos de pasta en las proporciones requeridas para el tipo de papel a producir, el ajuste de la consistencia de la fibra (proporción de materia no acuosa) y la adición de productos químicos como

resinas, arcilla, talco, tintes o almidón para modificar las propiedades del papel resultante. [3]

Una vez preparada la pasta está lista para su entrada en la máquina de papel, que consiste en una serie de etapas sucesivas de deshidratación. Según el grado de humedad de la lámina continua de papel los procesos llevados a cabo a lo largo de la máquina de papel se dividen en un extremo inicial húmedo y un extremo final seco.

El primer elemento del extremo húmedo es la caja de admisión, la cual recibe una suspensión diluida de fibras, colorantes y productos químicos con una consistencia inferior al 2%. La caja de admisión dispone esta suspensión controlada y uniformemente a través de todo el ancho de una fina malla metálica en movimiento con pequeños orificios a lo largo de la cual se produce su drenaje y la consiguiente formación de una lámina de fibras entretejidas orientadas en el sentido del movimiento de la malla. Al finalizar el drenaje, la consistencia de la lámina es de entre un 10 y un 20%. [4]

La lámina continua así formada pasa de la malla a una sección de prensado compuesta por rodillos recubiertos de un fieltro absorbente que la comprimen haciendo que se desprenda gran parte de su contenido en agua, pasando a una consistencia de en torno al 50%. El agua absorbida por el fieltro es extraída de éste mediante cajas de vacío quedando con ello de nuevo preparado para la absorción cuando el giro del rodillo le lleve a volver a comprimir la lámina.

Tras el prensado comienza la sección seca de la máquina de papel, en la que se fija el grado de humedad final del papel por evaporación en el proceso de secado y en la que se pueden aplicar nuevas modificaciones y aditivos a su superficie por medio de procesos como el estucado o el calandrado.

En el proceso de secado, la lámina de papel pasa sobre unos cilindros calentados por vapor dispuestos alternativamente de forma que la evaporación se produce homogéneamente en ambas caras de la lámina. En este punto su contenido en materia seca es de cerca del 95%.

Dado que la lámina de papel tiene una superficie áspera inapropiada para la impresión, es común la aplicación de una mezcla de agua, ligantes, pigmentos blancos y aditivos químicos denominada "estuco". El estucado se lleva a cabo mediante sistemas de prensas o rodillos y confiere al papel una mayor calidad, blancura, imprimibilidad y durabilidad. [2]

Para terminar, el papel es bobinado en unos rollos cuyo ancho viene determinado por la anchura de la malla de drenaje de la sección húmeda. Para transformar los rollos en el producto final de papel, éstos son cortados a la medida requerida mediante cuchillas giratorias o guillotinas que los convierten en hojas.

5.2. Mejoras de eficiencia energética

Las mejores técnicas disponibles (MTD) para cada sector industrial están recogidas en los documentos BREF (Best Available Techniques Reference Documents) publicados por la Comisión Europea. En ellos se definen técnicas relativas a diversos ámbitos como la gestión de materiales, las emisiones atmosféricas, el ruido, el tratamiento de aguas residuales, los residuos productivos o la gestión y eficiencia energética.

Las MTD para la industria de la pasta y el papel están recogidas en el documento BREF correspondiente de la Comisión Europea. En él se describen las MTD particulares para cada uno de los métodos de producción de la pasta anteriormente descritos y para el proceso común de fabricación de papel, resultando la siguiente clasificación:

- Mejoras en el proceso de fabricación de pasta Kraft
- Mejoras en el proceso de fabricación de pasta al sulfito
- Mejoras en la fabricación de pasta mecánica y quimicomecánica
- Mejoras en el proceso de papel recuperado
- Mejoras en el proceso de fabricación de papel

De forma general para todos los métodos y procesos anteriores se destaca la importancia de factores como la educación, formación continua y motivación de los operarios y personal de trabajo de las fábricas de pasta y papel para una óptima operación y control. Se recomienda asimismo la optimización del control de procesos para reducir la producción de sustancias contaminantes y emisiones.

Para mantener el rendimiento de las unidades técnicas de producción de pasta y papel a un alto nivel se propone la revisión y mejora de su mantenimiento. Por último se hace referencia a la importancia de un sistema de gestión medioambiental que defina las principales responsabilidades ambientales, fomente la concienciación e incluya objetivos y medidas. [4]

El consumo energético supone en torno al 20% de los costes productivos totales de la industria del papel, teniendo el mayor peso en su estructura de costes después de la adquisición de materias primas (30%) [11]. Esto hace especialmente positivo en términos de competitividad el impacto de la implantación de las MTD relativas a la eficiencia energética que se recogen a continuación.

5.2.1. Mejoras en el proceso de fabricación de pasta Kraft

Las MTD más destacables para la mejora de la eficiencia energética en el proceso de producción de pasta Kraft son:

El descortezado en seco (también aplicable en el método del sulfito)

El funcionamiento de las descortezadoras húmedas se basa en el golpeo de los troncos de madera contra las paredes de un tambor utilizando para ello grandes cantidades de agua.

En el descortezado en seco el agua se utiliza solo para el lavado de los troncos por lo que la corteza que se retira presenta un bajo contenido en agua. Con ello se consigue reducir el volumen de aguas residuales de los 3-10 m³ por tonelada de pasta en el descortezado húmedo a 0,5-2,5 m³ en el descortezado en seco, a la vez que se produce una mejora energética en el aprovechamiento de la corteza como combustible auxiliar debido a su bajo contenido en humedad. [4]

Recogida de los vertidos (también aplicable en el método del sulfito)

El licor de proceso puede presentar pérdidas por desbordamientos en tanques, en el lavado y tamizado de la pasta, en juntas de bombas y válvulas de suministro del licor, o en los arranques y paradas de la producción.

La MTD consiste en la reducción al mínimo de las descargas de estos efluentes de proceso, devolviendo el licor y las fibras recogidas a través de sumideros al proceso en los puntos precisos. Esto resulta beneficioso ambiental y económicamente ya que se reducen los vertidos a la vez que se produce una recuperación energética y de productos químicos. [4]

Aumento del contenido en materia seca del licor negro

El licor negro (fluidos residuales de la cocción) originado en el proceso de producción de la pasta puede ser concentrado y utilizado como combustible para el propio proceso de cocción inyectándolo en la caldera de recuperación.

La evaporación convencional a la que se somete al licor negro para concentrarlo resulta en un contenido de materia seca en éste de alrededor del 65%. La instalación de superconcentradores puede elevar esta proporción hasta un 80% aunque el máximo contenido de materia seca alcanzable está limitado por factores como el tipo de madera, la viscosidad y la temperatura, siendo por ejemplo para el caso del eucalipto de un 70%.

La superconcentración del licor negro produce en su posterior uso como combustible un aumento de la capacidad de la caldera de recuperación, con ahorros de energía en el proceso de producción que pueden ir del 1 al 7%. [4]

De igual modo que el licor negro, los gases diluidos formados en la manipulación del licor negro y blanco, en el lavado de la pasta o en los conductos de recogida de efluentes, también pueden ser recogidos y concentrados para su incineración en la caldera de recuperación.

Entre las MTD para un bajo consumo de energía eléctrica destacan el control de velocidad en los grandes motores, la utilización de bombas de vacío más eficientes y el adecuado dimensionamiento de conducciones, bombas y ventiladores.

5.2.2. Mejoras en el proceso de fabricación de pasta al sulfito

Dada la gran similitud entre la mayoría de los procesos presentes en los métodos Kraft y del sulfito, la mayoría a de las MTD relativas a la eficiencia energética aplicables en el método Kraft lo son también en el método del sulfito por lo que no se dispone de demasiada información específica para los procesos particulares del método del sulfito. Se describen no obstante a continuación dos MTD para la producción de pasta al sulfito con implicaciones energéticas y en el correcto funcionamiento de la planta.

Pretratamiento anaerobio de los condensados

Los condensados de la evaporación del licor blanco de las plantas de producción de pasta al sulfito presentan altas concentraciones de sustancias orgánicas fácilmente biodegradables. Por ello, estos residuos pueden ser sometidos a un tratamiento de digestión anaerobia⁶ en el que se genera biogás que puede ser aprovechado como combustible para la producción de calor para los procesos de la propia planta.

Prevención de la alteración del funcionamiento normal y reducción de consecuencias de accidentes

El circuito químico de las plantas de pasta al sulfito incluye el suministro de dióxido de azufre (SO₂) líquido. Esto implica que tanto los tanques de almacenaje y licuefacción del SO₂ como los conductos para su suministro deben ser objeto de un riguroso análisis de seguridad. [4]

La MTD pretende fijar pautas al respecto para la explotación de la planta con un menor riesgo para el medio ambiente y el vecindario adyacente, de forma que se

⁶ “La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias orgánicas específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (CH₄, CO₂, H₂, H₂S, etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.” [10]

reduzcan las probabilidades de sufrir un accidente importante y se limiten los eventuales efectos en su funcionamiento.

5.2.3. Mejoras en la fabricación de pasta mecánica y quimicomecánica

Las MTD relativas a los aspectos energéticos en la producción de pasta mecánica (algunas de ellas de carácter general) son las siguientes: [4]

- La implantación de sistemas de supervisión del consumo y del aprovechamiento de la energía en los equipos mecánicos.
- La modernización y sustitución de los equipos mecánicos por otros con un consumo energético menor y que tengan la posibilidad de realizar un control automatizado.
- La reducción de las pérdidas de energía derivadas del rechazo en el tamizado de grumos o fibras gruesas que no han sido completamente reducidas después de los procesos de desfibrado y refino, conduciéndolos a una segunda etapa de refino en lugar de retirarlos como material de desecho. De esta forma no se desaprovecha la energía mecánica que fue consumida al reducirlos parcialmente en la primera etapa de desfibrado/refino.
- La utilización de sistemas para la recuperación de calor en los métodos termomecánicos (TMP) y químico-termomecánicos (CTMP) ya que en ellos, en la etapa de refino, dos terceras partes de la energía eléctrica se transforma en energía térmica en forma de vapor. Este vapor puede ser limpiado y posteriormente utilizado para fines de secado en la sección seca de la máquina de papel.

La implantación de sistemas de cogeneración de calor y electricidad: La cogeneración (cuya descripción en detalle ya se realizó en el capítulo 4 del presente documento) es una técnica ampliamente desarrollada y aplicada en plantas de producción de pasta y papel.

Esto se debe a que los altos, equilibrados y mantenidos requerimientos de calor y electricidad en las proporciones en las que son demandadas por esta rama industrial resultan óptimos para la instalación de estos sistemas.

Como medida de mejora, la cogeneración se puede aplicar en las fábricas existentes que no dispongan de ella remodelando las turbinas de vapor a contrapresión para la constitución de un ciclo combinado de cogeneración con una inversión aproximada de 1000 € por kilowatio instalado. [4]

Los sistemas de cogeneración hacen que las fábricas de pasta y papel sean más independientes de los proveedores externos de electricidad, llegando a producir excedentes en la mayoría de los casos, los cuales pueden ser inyectados a la red en base a las condiciones descritas en el capítulo 4.

La incineración de residuos sólidos para la producción de energía: Los residuos sólidos producidos en una fábrica de pasta mecánica se componen de fragmentos de madera, corteza, rechazos del tamizado o lodo residual de la pasta mecánica, siendo estos últimos típicamente desechados a un vertedero.

La MTD consiste en la deshidratación de los lodos mediante prensas de doble tela, prensas tornillo o métodos centrífugos para su posterior incineración en la caldera junto con el resto de residuos sólidos del proceso. [4]

5.2.4. Mejoras en el proceso de papel recuperado

En el proceso de producción de pasta a partir de fibra recuperada, la instalación de sistemas de cogeneración es también considerada como una de las mejoras disponibles.

Reducción del consumo de agua fresca mediante el cierre de los circuitos de agua

Las fábricas de papel a base de fibras recicladas son integradas en su mayoría. Este hecho posibilita el reciclaje del agua de proceso en sentido contrario al avance del producto, es decir, utilizando el exceso de agua de la máquina de papel en la sección de blanqueo y el agua de la sección de blanqueo en la de producción de la pasta.

Esta configuración hace posible el abastecimiento de agua de toda la planta con la única aportación de agua fresca a la sección de la máquina de papel, ya que en las secciones previas la calidad del agua no es un factor muy significativo en la producción de papel reciclado.

Con ello la aportación de agua fresca a la planta de papel recuperado puede reducirse a tan sólo 1 m³ por tonelada de pasta. [4] La medida también repercute positivamente en el consumo de energía y en la minimización de las pérdidas de fibra y licores.

Aprovechamiento energético de residuos del reciclaje

En las plantas de pasta recuperada sin destintado los residuos representan entre un 4 y un 10% de la materia prima aportada y están compuestos por impurezas gruesas de la disolución de papel reciclado, de rechazos de los procesos de tamizado y preparación de la pasta, y de lodo de tratamiento de las aguas residuales. En las plantas

que incluyen el proceso de destintado, la proporción de residuos asciende a un 15-40% debido a los aportes del lodo de destintado, formado por fibras cortas, estucos y partículas de tinta.

El tratamiento predominante de estos residuos en la actualidad es su deshecho a los vertederos. La MTD consiste en el aprovechamiento de su contenido energético usándolos como sustitutivos de los combustibles fósiles, dado que su poder calorífico se sitúa entre 22 y 24 MJ/kg debido a su alto contenido en materiales plásticos. [4]

5.3.5. Mejoras en el proceso de fabricación de papel

Optimización de la deshidratación en la sección de prensado de la máquina de papel

La MTD consiste en la sustitución de las prensas de rodillo para la deshidratación del papel convencionales (de prensor corto) por prensas de zapata de prensor ancho. El efecto es un aumento del tiempo de contacto del prensor con la lámina húmeda que deriva en una deshidratación intensificada de ésta que resulta comparativamente entre un 5 y un 15% superior a la obtenida mediante el prensado convencional.

El grado de humedad con el que la lámina llega a la sección de secado (o sequería) después de su paso por la sección de prensado tiene grandes implicaciones en el consumo de energía ya que es en la sección de secado donde se produce la mayor parte del consumo energético de la máquina de papel. Este consumo se debe a la elevada generación de vapor para el secado y a los numerosos motores eléctricos para mover los rodillos y cilindros.

Esto implica que cuanto mayor sea el grado de sequedad a la entrada de la sequería menor será el consumo energético para el secado; teniéndose que para un aumento de la sequedad de un 1% el posterior ahorro de energía térmica puede ascender a un 4%. Con ello, los casos prácticos de aplicación de esta medida arrojan ahorros energéticos en la sección de secado de entre un 20 y un 30%. [4]

Además del ahorro de energía térmica, la medida consigue mejorar la operatividad de la máquina de papel debido a que la mayor consistencia de la lámina que se obtiene por su superior grado de sequedad reduce en gran medida las interrupciones de producción por roturas intempestivas de la lámina continua de papel, lo que se traduce en un aumento promedio de la capacidad productiva cercano al 3%.

La inversión total para la compra e instalación de una prensa de zapata se sitúa en torno a unos 10 M€ con un tiempo de retorno de la inversión de unos 2,5 años debido a unos ahorros económicos finales de entre 20 y 30 € por tonelada de papel producida.[4]

Medición y automatización

La instalación de sistemas para la medición y la automatización en los procesos llevados a cabo a lo largo de la máquina de papel persigue el control preciso de sus principales parámetros para garantizar una operativa estable y una calidad uniforme.

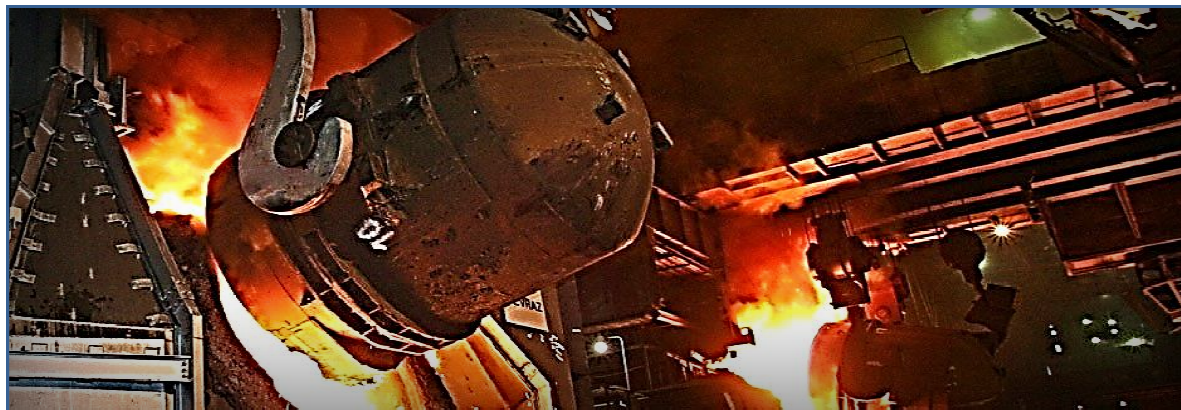
La medida es aplicable en la zona húmeda para el análisis del agua presente en la pasta para una determinación temprana de posibles problemas en su química o su consistencia que puedan afectar en el proceso posterior en forma de roturas.

Estos sistemas también son de utilidad en el mezclado y dosificación de la pasta evitando desajustes y dotando de uniformidad al proceso. También son aplicables en la determinación de la materia sólida en suspensión para la optimización del filtrado y la consecuente reducción de las pérdidas de fibras.

En definitiva, la medición y automatización permite una mayor rapidez en los cambios de calidad de papel, las paradas y recuperaciones tras roturas, el uso más eficaz de los aditivos químicos, una mejora de la productividad y un menor consumo de energía. [4]

Capítulo 6. Industria siderúrgica

Figura 69: Industria siderúrgica



Inelectra, Infraestructura, industrias básicas y transporte masivo, Proyectos, Siderúrgica Nacional

La siderurgia es la rama de la metalurgia que se ocupa del conjunto de técnicas cuyo objetivo es la obtención de productos de hierro o sus aleaciones con carbono. En función del contenido en carbono de la aleación ésta se puede clasificar en dos tipos: el acero (con un contenido en carbono comprendido entre el 0,03 y el 1,76%) y la fundición (con contenidos en carbono entre 1,76 y 6,67%), siendo el primero de ellos el más importante por sus aplicaciones industriales. [1]

Los aceros pueden ser aleados adicionalmente con otros elementos como boro, cobalto, níquel, cromo o wolframio, que le proporcionan propiedades especiales como una mayor dureza, tenacidad, templabilidad o resistencia a la corrosión.

El acero posee unas excelentes propiedades mecánicas y estructurales en relación con su peso además de presentar buenas cualidades para su conformado, su mecanizado, su ensamblaje o su resistencia a la corrosión. Por ello tiene multitud de aplicaciones en la construcción, las infraestructuras, la industria automovilística, naval o ferroviaria, y en fabricación utensilios, equipos mecánicos, electrodomésticos o maquinaria en general.

El hierro, del que se compone básicamente el acero, es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (constituyendo en torno al 5% de ésta) aunque no se presenta en estado puro en la naturaleza sino combinado con otros elementos formando óxidos, carbonatos o sulfuros que constituyen el mineral de hierro o mena que deberá ser extraída de las minas. Junto con la mena se encuentran otros compuestos e impurezas que forman la ganga, la cual deberá ser separada en el proceso siderúrgico.

6.1. Proceso de producción del acero

El acero se puede obtener fundamentalmente a partir de dos materias primas:

- Arrabio: se obtiene a partir del mineral hierro en el proceso integral de producción del acero por medio de un alto horno.
- Chatarra: se basa en el aprovechamiento del material férreo contenido en productos metálicos que son reciclados mediante su fusión para la obtención de nuevo acero.

El proceso de fabricación utilizado depende de cuál de estas dos materias primas se vaya a emplear, resultando dos procedimientos: el proceso siderúrgico integral, que se lleva a cabo a partir del arrabio requiriéndose un alto horno y un convertidor de oxígeno, y el proceso de producción mediante horno de arco, que utiliza la chatarra como materia prima.

En ambos casos, la obtención del acero deseado requiere de la eliminación de las impurezas presentes en el arrabio o la chatarra y del control de las de las cantidades de los elementos que influyen en las propiedades del acero.

6.1.1. Proceso siderúrgico integral

En el proceso siderúrgico integral se parte del mineral de hierro, el cual se peletiza o sinteriza para facilitar su manejo y mejorar la eficiencia de las reacciones. El mineral de hierro se introduce en el tragante⁷ del **alto horno** junto con fundentes⁸ y coque, generándose arrabio y escoria como resultados del proceso. [2]

El coque es el combustible que libera el calor necesario para fundir el mineral y el agente que emite el gas reductor (CO) que transforma los óxidos de hierro en arrabio. El coque resulta del tratamiento del carbón dado que éste en su estado natural contiene elementos perjudiciales para la obtención del acero (azufre, potasio, sodio, nitrógeno, calcio, etc).

⁷ El tragante es la zona más alta y estrecha de la cuba del alto horno por la cual se cargan los materiales sólidos (minerales, fundentes y coque).

⁸ La misión de los fundentes es combinarse con las impurezas bajando su punto de fusión, permitiendo con ello aglutinarlas en la escoria en estado líquido y posibilitar su separación del arrabio dada su menor densidad. El fundente más utilizado es la caliza, aunque también se emplean otros como el sílice o la dolomita.

Para la obtención del coque, el carbón mineral es molido homogeneizado y posteriormente introducido en un horno. El coque es un producto constituido casi en su totalidad por carbono, que a diferencia del carbón tiene un bajo contenido en azufre y libera una reducida cantidad de ceniza y materia volátil en su combustión. [3]

El arrabio es una mezcla de hierro fundido y una alta cantidad de impurezas (como pueden ser silicio, fósforo, manganeso o azufre), así como un excesivo contenido en carbono (en torno al 6%) que de no reducirse haría que el acero fuese frágil y quebradizo.

Para la eliminación de estos componentes indeseados, el arrabio en estado fundido es primeramente sometido a un proceso de desulfuración consistente en la inyección de una mezcla de cloruro y carbonato de calcio que reacciona con el azufre.

En la siguiente fase del proceso siderúrgico el arrabio se somete al proceso de afino para ajustar el contenido de carbono a proporciones características del acero industrial, eliminar el resto de impurezas y añadir elementos para conferir las propiedades deseadas al acero resultante. Esto se lleva a cabo en un elemento llamado convertidor de oxígeno.

La oxidación del arrabio se realiza insuflando oxígeno por medio de una lanza de modo que éste se asocia con el carbono contenido en el arrabio formando CO y CO₂ que escapa en forma de gas produciéndose la descarburación.

La inyección de oxígeno en el convertidor provoca reacciones altamente exotérmicas de modo que esta etapa no requiere ningún tipo de combustible. Durante el proceso de afino se introduce en el convertidor cierta cantidad de chatarra para aportar óxidos de hierro y controlar la temperatura del proceso, que de otro modo podría ser demasiado alta.

Para eliminar las impurezas aún presentes en el metal fundido se realiza, de igual manera que en el alto horno, el aporte de fundentes al convertidor para la formación de escoria. En la fase final se añaden ferroaleaciones con altos contenidos de elementos como cromo, titanio, wolframio, níquel o cobre para modificar la composición del acero y mejorar sus propiedades.

Cuando finaliza la inyección de oxígeno, se toma una muestra y se analiza para verificar si la composición del acero es la deseada o si por el contrario es precisa la aportación de oxígeno o elementos de aleación en mayores proporciones. Posteriormente se procede a la eliminación de la escoria y al vertido del acero en una cuchara por medio de la cual se llevará el metal fundido a la última fase del proceso: la colada del acero.

La producción de una tonelada de acero a partir de mineral hierro requiere unas materias primas cuyas cantidades aproximadas son 1400 kg de mineral de hierro, 250 kg de piedra caliza y entre 500 y 650 kg de carbón en forma de coque, además de un

aporte energético de unos 20 GJ [4]. Los subproductos residuales más importantes generados en el proceso son entre 200 y 400 kg de escoria y de 2,5 a 3,5 toneladas de emisiones gaseosas (dióxido de carbono en su mayoría junto con óxidos de nitrógeno y azufre).

6.1.2. Proceso siderúrgico no integral

El proceso de obtención del acero por medio del **horno de arco eléctrico** utiliza la chatarra como materia prima, aunque también se utilizan pre-reducidos de hierro obtenidos a partir de la reducción directa del mineral de hierro en fase sólida mediante agentes reductores como gas natural o carbón. El proceso (que ya fue descrito en detalle en el apartado de armónicos del capítulo 4 del presente documento) se basa en la fusión de la carga contenida en el horno de arco por el calor producido por el arco eléctrico que se establece entre los electrodos. [2]

La etapa de afino en este caso se realiza en dos fases, la primera de ellas en el propio horno de arco y la segunda en un horno cuchara. En la primera fase se eliminan del metal fundido las impurezas y elementos no deseados, y se realiza un primer ajuste de su composición química mediante ferroaleaciones.

El metal resultante se vacía en una cuchara que hace las veces de segundo horno de afino en el que se realiza el ajuste definitivo de las propiedades del acero. Después de esta fase, de igual forma que en el proceso siderúrgico integral, se lleva a cabo la colada del acero consistente en la conversión del acero líquido en un semiproducto siderúrgico acorde para su posterior transformación en productos de uso industrial.

Figura 70: Fases y materiales del proceso siderúrgico



Fuente: ALACERO (Asociación Latinoamericana del Acero), Proceso siderúrgico

De forma general se pueden distinguir dos tipos de colada:

- Colada de lingotes: es el método tradicional consistente en el vertido del acero fundido en lingoteras de las que se extrae una vez solidificado para su posterior procesado.
- Colada continua: es el método más utilizado en la actualidad. En él, el acero se cuela en un molde abierto por el fondo que es alimentado indefinidamente y del que sale de forma continua el producto en estado sólido en forma de palanquilla, tochos, planchones, etc. [2]

Los semiproductos se encuentran constantemente en movimiento conducidos por una serie de rodillos mientras se enfrían por medio del aire o pulverización de agua y se cortan en las longitudes deseadas. Para transformar estos semiproductos en productos aptos para un fin comercial, son sometidos a procesos de forja (conformado por deformación plástica) o laminación en caliente.

La laminación en caliente se realiza por medio de un laminador en el que los semiproductos son prensados y estirados mediante cilindros que giran en sentidos opuestos y ejercen una presión sobre el acero aprovechando su mayor ductilidad a altas temperaturas. Esta laminación en caliente permite obtener productos planos para placas o chapas en bobina ó productos largos para barras, perfiles o carriles.

El acero también puede tratarse térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas modificando la microestructura del metal. Algunos de estos procesos son el temple, el revenido, el recocido o el normalizado. [2]

A menudo los productos son posteriormente sometidos a procesos de acabado como la laminación en frío para reducir su espesor o a tratamientos superficiales, en los cuales se aplican recubrimientos o revestimientos electrolíticos como el cromado, el cincado, el galvanizado o el niquelado.

6.2. Mejoras de eficiencia energética

Las medidas recogidas en el documento BREF para la mejora del sector siderúrgico se clasifican básicamente en:

- Mejoras de carácter general
- Mejoras para plantas de sinterización
- Mejoras para plantas de peletización
- Mejoras en la producción de coque
- Mejoras en los altos hornos
- Mejoras en la fabricación de acero y la colada en convertidores de oxígeno
- Mejoras en la fabricación de acero y la colada en hornos eléctricos de arco

A continuación se estudian para cada uno de los casos las mejoras relativas al ámbito de la eficiencia energética.

6.2.1. Mejoras de carácter general

Las MTD de aplicación general de mayor interés de cara a la mejora de la eficiencia energética son las relativas a la gestión energética, las cuales persiguen la reducción del consumo de energía térmica.

Para ello se propone la vigilancia en tiempo real de los principales flujos energéticos y procesos de combustión para posibilitar un mantenimiento que garantice el funcionamiento ininterrumpido del proceso productivo de la planta. Se plantea también la implantación de herramientas de información y análisis para verificar el consumo energético medio de los principales procesos y poder realizar comparaciones de los valores a largo plazo.

En lo relativo a los calores residuales, éstos pueden ser recuperados por medio de intercambiadores de calor para ser distribuidos a otras zonas de la acería, a una red urbana de calefacción o a sistemas de cogeneración para la producción de vapor o electricidad. El aprovechamiento de estos calores dentro de la propia planta puede ser utilizado para fines como el precalentamiento del aire de combustión en hornos u otros sistemas quemadores, lo que permite minimizar las necesidades de combustible y producir un ahorro de energía.

Destaca también la importancia de los sistemas para la recuperación de los gases de proceso como los producidos en el convertidor, el alto horno o el horno de coque, para su posterior enriquecimiento y combustión o para su almacenamiento a corto plazo en gasómetros o tanques que se recomienda instalar para este fin.

En cuanto a la minimización del consumo eléctrico se proponen mejoras consistentes en la instalación de sistemas de gestión de la energía y equipos eléctricos de alta eficiencia para la molienda, el bombeo, la ventilación o el transporte. [8]

6.2.2. Mejoras en las plantas de sinterización

La sinterización (cuyo cometido y ubicación en el proceso productivo ya ha sido indicado en el apartado 6.1) consiste en el pretratamiento del mineral de hierro mediante la aglomeración de partículas finas del mineral por combustión. Se lleva a cabo el calentamiento del mineral junto con material fundente y coque o carbón como combustibles, produciéndose una masa semifundida que se solidifica dando lugar a fragmentos porosos de sinterizado con el tamaño y características precisas para servir como materia prima para el alto horno. [6]

En las plantas de sinterización se producen calores residuales en las máquinas sinterizadoras y en el sistema de refrigeración, que son potencialmente aprovechables. Algunas de las MTD para la reducción del consumo energético en base a este potencial de aprovechamiento son:

- La recuperación del calor residual de la instalación de refrigeración de sinterizado, aprovechándolo para precalentar el aire de combustión de la campana de ignición de la planta de sinterización o la mezcla bruta de sinterizado, o bien para la generación de vapor destinado a su utilización en la acería o de agua caliente para la calefacción urbana.
- La recirculación directa de los gases residuales a la parrilla de sinterización. La técnica requiere cubrir por completo la parrilla de sinterización e instalar ventiladores de succión, lo que comporta un aumento del consumo de energía eléctrica que merece la pena dada la disminución del consumo de combustible en forma de coque de entre un 10 y un 15%. En los casos prácticos la inversión necesaria es de unos 17 M€ y el ahorro al año se cifra en unos 2,5 M€.

En las plantas de sinterización se desaconseja la recuperación del calor de los gases residuales mediante un intercambiador de calor debido a problemas de condensación y corrosión. [8]

6.2.3. Mejoras en las plantas de peletización

La peletización es el proceso de aglomeración del mineral hierro, previamente molido en finas partículas, mediante la adición de agentes aglomerantes para obtener partículas esféricas redondeadas en tambores rotatorios y endurecidas en una parrilla de cocción. La finalidad de este proceso es preparar la materia prima portadora de hierro de forma que las características para su aprovechamiento en el alto horno sean óptimas. [9]

Las mejoras disponibles para las plantas de peletización se basan en la máxima utilización del calor de la parrilla de cocción para integrarlo en el propio proceso de peletización o utilizarlo en redes de calefacción internas o externas.

Instalación de conducto de recirculación de aire caliente: en el proceso de peletización el calor excedente de la sección de refrigeración puede ser transmitido al aire de alimentación de la sección de cocción, y el calor excedente de la sección de cocción puede ser a su vez aprovechado para la sección de secado de la unidad de molienda.

La aplicación de esta técnica conduce en casos prácticos a una reducción del consumo de energía en el proceso de peletización de entorno al 4%, lo que conlleva unos ahorros en los costes energéticos de 2,8 M€/año sobre una inversión de 5M€.[7][8]

6.2.4. Mejoras en hornos de coque

Las medidas de eficiencia más destacables en la producción de coque son: [8]

- La incorporación al carbón de alimentación de la planta de coquización de residuos de producción reciclados como el alquitrán o lodos activados excedentes de la depuradora de aguas residuales.
- La reutilización del agua de apagado para minimizar el consumo de ésta.
- La reducción del consumo energético en el proceso utilizando el gas de coquización extraído como combustible o agente reductor.

6.2.5. Mejoras en altos hornos

Entre las mejores técnicas disponibles para los altos hornos se encuentran: [7][8]

El uso de minerales de alta calidad: la utilización de una materia prima de alto contenido en hierro y bajo contenido en ganga (sínter con un porcentaje de hierro del 61-63,5% y pellets del 66,6-66,8%) conlleva una mejora de la productividad gracias a la reducción del consumo energético y la necesidad de agentes reductores. Esta práctica supone asimismo una reducción de las emisiones de CO₂ de entre 15 y 80 kg por tonelada de metal fundido producida y una disminución de la cantidad de escoria generada de entre 150 y 200 kg por tonelada.

La inyección directa de agentes reductores: la sustitución de parte del coque por otras fuentes de hidrocarburos como alquitrán, carbón pulverizado, residuos de aceite, gas de coquización, gas natural o residuos plásticos, inyectados en el alto horno a través de la tobera reduce la demanda energética y la contaminación.

Pese a que llevar a cabo esta técnica hace precisa una inyección adicional de oxígeno para poder alcanzar las temperaturas requeridas en el alto horno, el ahorro de energía consecuencia de la reducción del consumo de coque se estima en un 3,6% del consumo de energía total del alto horno para una tasa de inyección de hidrocarburos de 180 kg por tonelada de metal fundido.

La recuperación y utilización del gas de alto horno: Un alto horno típico produce entre 1200 y 2000 m³ de gases por tonelada de metal caliente producida. Estos gases se componen de un 20-28% de CO (que tras oxidarse pasa en su mayoría a CO₂) y un 1-5% de hidrógeno. Los gases pueden ser limpiados y almacenados para su posterior uso como combustible.

El poder calorífico del gas de alto horno es de tan sólo entre 2,7 y 4 MJ/m³ (una décima parte del poder calorífico del gas natural) por lo que a menudo son enriquecidos con gas de horno de coque o gas natural antes de su uso como combustible. Pese a ello, las grandes cantidades en las que son producidos hacen que exista un potencial de recuperación energética de aproximadamente 5 GJ por tonelada de metal caliente producida, lo que equivale a un 30% del consumo de energía bruto del alto horno.

El ahorro energético en el funcionamiento de las estufas de los altos hornos: la función de las estufas es la de precalentar el aire de alimentación para el alto horno quemando sus propios gases de escape previamente enriquecidos para aumentar su poder calorífico.

Con el funcionamiento de las estufas asistido por ordenador se consigue adaptar y minimizar la cantidad de gas enriquecedor que es necesario añadir para aumentar el poder calorífico. Esta minimización mejora la eficiencia de la estufa en la práctica en torno a un 5%.

Para la optimización de la eficiencia energética de las estufas, parte del calor de los gases de escape del alto horno puede ser recuperado para precalentar el combustible o el aire de combustión, aunque esto solo resulta rentable cuando en este intercambio la temperatura de los gases de escape es superior a 250°C. Adicionalmente se propone la utilización de quemadores más adecuados en las estufas para mejorar la combustión, y de sistemas de rápida medición del oxígeno para adaptar las condiciones de combustión.

La aplicación de todas las anteriores medidas a las estufas puede aportar en la práctica ahorros de 0,5 GJ por tonelada de metal caliente.

La recuperación de la energía de la presión del gas de alto horno: consiste en la instalación de una turbina a la salida de los gases, después del dispositivo para su limpieza. La recuperación de esta energía es viable en altos hornos con una presión de los gases superior a 1,5 bar (en los altos hornos modernos es de entre 0,5 y 2,5 bar).

El ahorro de energía con la instalación de una turbina de 15 MW se estima en 0,4 GJ por tonelada de metal fundido, lo que equivale en torno a un 2% de la demanda de energía bruta del alto horno, siendo las turbinas axiales las más eficientes para este cometido.

La rentabilidad de la turbina aumenta con el volumen de gas y con la presión de éste por lo que, en función de estos factores, los periodos de recuperación de la inversión pueden variar entre 3 y 10 años.

6.2.6. Mejoras en el convertidor de oxígeno

Entre las MTD para la mejora de la eficiencia energética en los convertidores de oxígeno están:

- La recogida, depuración y almacenamiento del gas residual del convertidor para utilizarlo posteriormente como combustible en el alto horno. Para lograr la captación del 80% de los gases producidos, se requiere de la instalación de una campana y ventiladores para captar los gases, conductos de gas, válvulas y sistemas de seguridad. En los casos prácticos la inversión necesaria es de 30,5 M€ y el tiempo de retorno de unos 5 años.
- La reducción del consumo energético mediante la utilización de cucharas con tapa de ladrillo refractario, para el transporte del acero líquido del convertidor al proceso de colada.

El proceso de colada continua de banda estrecha: consiste en realizar una colada continua de bandas próximas a la forma final, de un espesor inferior a 15mm. Este proceso permite prescindir del horno intermedio de recalentamiento y facilita el trabajo de laminación en caliente con el consiguiente ahorro energético. La aplicabilidad de esta técnica depende del tipo de producto final que se fabrique en la acería no siendo apta, por ejemplo, para la producción de chapas gruesas. [8]

6.2.7. Mejoras en el horno de arco eléctrico

Para los hornos de arco eléctrico destaca como técnica para el ahorro energético el precalentamiento de la chatarra (que será posteriormente introducida en el horno) mediante los gases de escape producidos en el funcionamiento continuo del horno de arco.

Gracias a este precalentamiento, en función del método utilizado, se puede elevar la temperatura de la chatarra a entre 300 y 1000 °C. Con ello se puede conseguir un ahorro de energía eléctrica de entre 70 y 100 kWh por tonelada de metal fundido, lo que equivale a un 10-25% de la energía total requerida por el horno de arco. [7]

Capítulo 7. Industria metalúrgica

Figura 71: Industria Metalúrgica



Fuente: Elaboración propia en base a fuentes a pie de página⁸

La metalurgia es la técnica de la obtención y tratamiento de los metales desde minerales metálicos, incluyendo la producción de aleaciones. Comprende desde la extracción de los minerales en los yacimientos naturales hasta su posterior refinación a un grado de pureza comercial.

Los métodos metalúrgicos se dividen en tres categorías cuya aplicación dependerá de la naturaleza físico-química del mineral a tratar:

- Pirometalurgia: se basa en fundir el mineral metálico a altas temperaturas.
- Hidrometalurgia: consiste en disolver la fracción metálica en soluciones acuosas.
- Electrometalurgia: es la obtención de metales puros mediante la aplicación de energía eléctrica a soluciones acuosas con metal disuelto.

En base al origen de la materia metálica, el proceso metalúrgico es denominado primario cuando parte de minerales extraídos de la corteza terrestre, y secundario cuando se lleva a cabo a partir de material metálico reciclado (chatarra). [1]

La industria metalúrgica se puede clasificar en la metalurgia no férrea y la metalurgia férrea (siderurgia). El motivo de esta división es la gran importancia del procesamiento de hierro en volumen de producción frente al resto de los metales. Por ello en el presente documento se dedica un capítulo particular a la industria siderúrgica.

Este capítulo se centra en la industria metalúrgica no férrea, la cual engloba a las técnicas para obtención de una gran variedad de elementos metálicos. De entre todos

⁸Financial Post, "Copper prices rise on upbeat U.S. consumer data", Susan Thomas and Harpreet Bhal, Reuters, August 17, 2012 / Antofagasta, Media, Photo gallery, Michilla / El País, Hemeroteca, "Un obrero trabaja en una fundición de aluminio de Krasnoyarsk (Siberia)", Reuters, 7 de febrero de 2010 / Gobierno Bolivariano de Venezuela, Correo del Orinoco, Noticias, "Gobierno aprueba recursos para empresas y trabajadores del sector aluminio", 2 marzo 2013

ellos, se estudiarán por su importancia y aplicabilidad en fines industriales, los procesos productivos y mejores técnicas disponibles del cobre y el aluminio.

7.1. Industria del cobre

El cobre es junto al oro y la plata uno de los metales más antiguos conocidos y utilizados por el hombre. Presenta unas excelentes propiedades de conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión, maleabilidad, ductilidad, y facilidad para su tratamiento mecánico, además de poder ser reciclado de forma indefinida manteniendo sus propiedades.

Al alearse con estaño (produciendo bronce) o con zinc (produciendo latón), puede adquirir propiedades adicionales como la resistencia a la tracción o una dureza y resistencia a la corrosión aún mayores.

Gracias a estas propiedades, el cobre y sus aleaciones son material insustituible en aplicaciones como los cables para el transporte de energía eléctrica, la fabricación de maquinaria industrial (motores y generadores eléctricos), la electrónica, las tuberías y conductos, calderas e intercambiadores de calor, y la industria de la construcción o del transporte.

El cobre rara vez se encuentra en la naturaleza como "cobre nativo" sino que se presenta principalmente en forma de menas sulfuradas (calcopirita) u oxidadas (cuprita o malaquita). [2]

7.1.1. Proceso de producción del cobre

El proceso de obtención del cobre puede seguir dos vías en función de la naturaleza oxidada o sulfurada del mineral:

- Mineral de cobre sulfurado: vía seca o método pirometalúrgico con cátodos electro-refinados como producto final. El 90% de los minerales de cobre se presentan en forma sulfurada en la naturaleza. [3]
- Mineral de cobre oxidado: vía húmeda o método hidrometalúrgico con cátodos por electro-deposición como producto final.

7.1.1.1. Método pirometalúrgico

Tras su extracción de las minas, el mineral sulfurado tiene un contenido en cobre del 0,5 al 2% por lo que es sometido a un proceso de concentración que consta de tres etapas: chancado, molienda y flotación. [3]

El chancado consiste en una primera reducción de los fragmentos de mineral a un tamaño no superior a unos 1,3 cm mediante grandes equipos eléctricos que trituran el mineral con movimientos vibratorios. En la molienda se continúa reduciendo el tamaño de los fragmentos hasta un tamaño inferior a 0,2 mm por medio de molinos cilíndricos giratorios con bolas de acero que golpean el mineral. En esta etapa se agregan al mineral reducido agua y los reactivos necesarios para formar una pulpa que es conducida al proceso de flotación.

El proceso de flotación permite separar el mineral sulfurado de cobre del resto de los elementos que componen la mayor parte de la roca original. La pulpa, impregnada de los reactivos necesarios, es introducida en celdas de flotación desde cuya base se inyecta aire que produce un burbujeo que arrastra al mineral sulfurado hasta la superficie de los tanques, donde la espuma rica en cobre formada es recogida al rebosar por los bordes del tanque. El producto obtenido recibe el nombre de concentrado de cobre y contiene una concentración de entre un 20 y un 50% de este elemento. El concentrado es posteriormente secado y conducido al proceso de tostación. [4]

La etapa de tostación es un proceso intermedio de eliminación parcial del azufre en el que se calienta el mineral concentrado a temperaturas entre 300 y 450 °C en condiciones oxidantes. Con ello, el azufre es parcialmente eliminado del concentrado al formar SO_2 .

Tras la tostación, el concentrado de cobre se lleva al proceso de fundición en un horno en el que se le hace pasar a estado líquido a temperaturas de entre 1200 y 1300 °C junto con sílice como fundente para formación de escoria. La escoria, compuesta fundamentalmente de hierro, sílice y una pequeña porción de cobre, se acumula en la parte superior del horno mientras que el cobre, por su mayor densidad, se deposita en la parte inferior de mismo. El cobre se extrae del horno de fundición en forma de un producto llamado "mata de cobre", con un contenido del metal de en torno a un 60%.

A continuación, la mata de cobre es sometida a un proceso de conversión que tiene por objetivo incrementar su riqueza en cobre, eliminando principalmente los restos de hierro y azufre mediante una gran oxidación. Con ello la mata de cobre pasa a "cobre blíster" con una pureza del 99%. En esta etapa se consigue eliminar también otras impurezas y elementos indeseables como arsénico, bismuto, cadmio, plomo o estaño, mientras que otros como níquel, cobalto, plata y oro no pueden ser eliminados en la conversión y deberán ser separados en la etapa de electro-refinación. [2]

Antes de la electro-refinación final, el cobre blíster pasa por una etapa de refinado al fuego (RAF) en la que es sometido a una oxidación adicional mediante la adición de aire e hidrocarburos tras la cual alcanza una pureza del 99,6%. El material fundido producido por el horno de refinado al fuego es dosificado en una rueda de moldeo de ánodos. Tras la solidificación, los moldes dan lugar a un producto llamado ánodo de cobre consistente en una chapa o lámina con dos salientes para su posterior manejo y sujeción.

Por último se lleva a cabo la electro-refinación, en la que los ánodos de cobre producidos se disponen en celdas electrolíticas que contienen una disolución de sulfato de cobre llamada electrolito a la que se aplica una corriente eléctrica de bajo voltaje. En estas celdas los ánodos actúan como electrodo positivo y son alternadamente separadas entre sí por placas inertes o cátodos que actúan como electrodo negativo. La corriente eléctrica afecta selectivamente a los iones de cobre que pasan de su ubicación en original en el ánodo a depositarse en la superficie de la placa inerte o cátodo, tras lo cual se obtienen placas de cobre de un 99,9% de pureza de en torno a 1m^2 y 55 kg de peso.[3]

Los elementos del ánodo que no sean cobre no pasan al cátodo, sino que son disueltos en el electrolito y se depositan en el fondo de la celda electrolítica. Esto produce la formación de un barro anódico rico en metales como níquel, cobalto, plata u oro que es bombeado para la posterior extracción de este valioso contenido.

7.1.1.2. Método hidrometalúrgico

Este método es utilizado para menas oxidadas o con un contenido en cobre muy pobre (inferior al 1%) ya que el coste para la extracción del cobre de estas menas utilizando otros métodos es demasiado alto. La vía hidrometalúrgica consta de tres etapas: la lixiviación, la extracción por solventes y la electro-deposición.

El mineral oxidado procedente de la mina es reducido a fragmentos de tamaño inferior a 1cm. A continuación se lleva a cabo el proceso de lixiviación (disolución) del mineral regándolo con una solución acuosa de ácido sulfúrico, que disuelve el cobre contenido en el mineral. Con ello se obtiene una solución de sulfato de cobre de baja concentración y con impurezas.

Para aumentar su contenido en cobre, la solución de sulfato de cobre es sometida a un proceso de extracción por solventes en el que es tratada con un reactivo orgánico que posibilita la separación de las impurezas. [3]

La disolución resultante de alto contenido en cobre es conducida a unas celdas electrolíticas en las que se disponen ánodos y cátodos de forma alternada siendo los primeros de metal inerte (plomo o titanio) y los segundos hojas de inicio de cobre puro.

Se aplica corriente eléctrica a los ánodos, lo que hace que los iones de cobre presentes en la disolución de sulfato de cobre se depositen uno a uno en los cátodos de inicio.

Las ventajas de la vía hidrometalúrgica frente a la pirometalúrgica son que todos los procesos se llevan a cabo a baja temperatura, que no se generan gases contaminantes, que la manipulación y transporte de los materiales en disolución por medio de bombas y tuberías es más barata y sencilla, y que permite el aprovechamiento de menas de muy bajo contenido en cobre.

Sus inconvenientes son que requiere materiales que soporten la acción altamente corrosiva de los productos utilizados y que los metales preciosos no son recuperables ya que en la etapa de lixiviación éstos no pasan a formar parte de la disolución al no ser solubles en ácido sulfúrico. [2]

7.2. Industria del aluminio

El aluminio es el tercer elemento químico más abundante en la corteza terrestre por detrás del oxígeno y el silicio. No obstante, debido a su alta reactividad química, nunca se encuentra como elemento libre sino formando aluminatos o silicatos. El mineral del que se extrae el aluminio es la bauxita, la cual se localiza fundamentalmente en las áreas tropicales y subtropicales del planeta.

Pese a su abundancia en la naturaleza, hace poco más de un siglo que se desarrollaron las técnicas necesarias para la producción de aluminio a escala industrial, siendo en la actualidad el metal no ferroso más producido en el mundo.

El aluminio es un metal blando, de baja densidad, no soluble en agua, no magnético, dúctil, maleable, resistente a la corrosión, inocuo para la salud, reciclable y con buenas propiedades eléctricas y para la reflexión de la luz. Puede formar aleaciones con otros elementos que le confieren una mayor resistencia, capacidad para ser mecanizado, facilidad para fundir o para admitir multitud de acabados.

Gracias a estas propiedades es un material fundamental para la industria aeronáutica, de la construcción (estructuras, puertas, ventanas o cerraduras), para la fabricación de piezas mecánicas, de cables eléctricos de alta tensión o de productos para fines alimenticios como el papel de aluminio, las latas o los tetrabrik. [5]

7.2.1. Proceso de producción del aluminio

Para extraer el aluminio contenido en la bauxita, ésta debe ser trasformada en alúmina (óxido de aluminio puro) mediante el "proceso Bayer". La alúmina es después sometida a una reducción electrolítica que da lugar al metal de aluminio fundido, el cual es posteriormente refinado y moldeado.

El objetivo del proceso Bayer es separar los óxidos de aluminio de las impurezas como óxidos de hierro o de silicio que forman la bauxita en su conjunto. Para ello la bauxita es molida e introducida junto con sosa cáustica en un dispositivo llamado digestor a alta presión y temperatura. Esto da lugar a una solución que contiene

aluminato sódico disuelto y a una mezcla de óxidos metálicos llamada "licor rojo" que es extraída mediante espesadores⁹.

La solución de aluminato sódico es enfriada y secada para que cristalice, y los cristales obtenidos son calcinados en hornos dando lugar al óxido de aluminio puro o alúmina, que es un polvo blanco de grano fino.

Posteriormente se lleva a cabo la reducción electrolítica de una mezcla denominada baño fundido, compuesta por alúmina (en proporciones del 2 al 6%) y criolita (fluoruro de aluminio y sodio). La criolita hace las veces de fundente, disminuyendo el punto de fusión de la alúmina, que es superior a los 2000 °C. [5]

La reducción tiene lugar a unos 960 °C en células electrolíticas conectadas en serie entre sí, formadas por un cátodo de carbono contenido en una carcasa de acero y aislado por ladrillos refractarios, y un ánodo también de carbono suspendido en una viga anódica conductora.

Se aplica una corriente continua de alta intensidad al ánodo (electrodo positivo) situado en la parte superior de la célula, que atraviesa el baño fundido hasta el cátodo (electrodo negativo) desde donde la corriente pasa a la siguiente célula. Durante el proceso se forma aluminio líquido que se deposita en el cátodo o parte inferior de la célula al mismo tiempo que el oxígeno producido en la disgregación de la alúmina se combina con el ánodo de carbono para formar CO₂. Esto hace que los ánodos de carbono se vayan consumiendo y tengan que ser remplazados.

El grado de pureza del aluminio así obtenido alcanza el 99,7% [5], teniendo impurezas como hierro, silicio, sodio, magnesio o hidrógeno. Para eliminar estas impurezas el metal fundido es refinado inyectando gas argón, cloro o nitrógeno en función del tipo de impureza a eliminar. Después de esta etapa se retiran las escorias superficiales producidas en el metal fundido, el cual es finalmente moldeado en planchones, perfiles o palanquillas.

Para la producción de una tonelada de aluminio son necesarias dos toneladas de alúmina, cantidad que a su vez necesita el aporte de cuatro toneladas de bauxita. Adicionalmente, debido al consumo de los ánodos de carbono durante la electrolisis, se consumen entre 0,4 y 0,45 toneladas de carbono por tonelada de acero producido. [6]

Los costes energéticos en la industria del aluminio pueden representar un 30% de los costes productivos totales, a merced de unos 11 GJ de energía térmica en la digestión y calcinación para la producción de cada tonelada de alúmina y un consumo eléctrico equivalente en la etapa de reducción electrolítica de entre 53 y 61 GJ por tonelada de aluminio. [6]

⁹ Un espesador es un aparato de separación continua de sólido-líquido, en el que los sólidos en suspensión se dejan decantar, produciendo un rebose de agua clarificada y un lodo concentrado en la descarga. [8]

El aluminio reciclado o secundario se produce a partir de chatarra compuesta por latas de bebida usadas, papel de aluminio, virutas, chatarra comercial o escorias superficiales de la producción primaria.

La chatarra se funde en hornos a los que se añade sal fundida como fundente, que es una mezcla de cloruros de sodio, potasio y fluoruros. Su función es evitar la oxidación y eliminar impurezas.

El metal fundido secundario así obtenido contiene magnesio como principal impureza y para su eliminación se inyecta gas cloro. El aluminio es después moldeado en productos semiacabados de igual forma que en el método primario de producción de aluminio.

7.3. Mejoras de eficiencia energética

A continuación se describen las mejores técnicas disponibles más destacables que se recogen en el documento BREF para la industria metalúrgica en los sectores del cobre y el aluminio.

7.3.1. Mejoras en el proceso de producción de cobre

-Los procesos pirometalúrgicos son altamente exotérmicos por lo que los gases de proceso poseen una gran energía térmica. En particular, los gases producidos en la tostación y fundición pueden ser conducidos a calderas para la producción de vapor para generar electricidad o para fines de calefacción. La generación eléctrica conseguida puede suponer un 25% del total de electricidad consumida en la planta. [6]

Otra forma de aprovechar la energía térmica de los gases del proceso de fusión del cobre es su utilización para precalentar el material concentrado de cobre antes de su entrada al propio horno de fusión. Se estima que un precalentamiento de 400°C produce un ahorro de energía en el horno de un 25% y que un precalentamiento de 500°C lo hace en un 30%.

-Se consideran MTD para la tostación, fusión y conversión el uso de los procesos Outokumpu y Mitsubishi: [6]

El proceso Outokumpu consta de un horno con el mismo nombre que se caracteriza por fundir el concentrado de cobre con un alto enriquecimiento de oxígeno, lo que da lugar a una mata de cobre de alta calidad. Esto hace posible que en algunos casos la transformación de concentrado de cobre a blíster se pueda llevar a cabo en un sólo paso prescindiendo de la etapa de conversión. En los casos en los que no es posible esta transformación directa, el horno Outokumpu facilita y simplifica el posterior proceso de conversión.

El proceso Mitsubishi consta de tres hornos interconectados: uno de fusión, uno eléctrico para la limpieza de escoria y uno convertidor. Los tres hornos se encuentran dispuestos a alturas descendentes con lo que la transferencia del material fundido se realiza por gravedad evitándose la transferencia con cuchara.

Todo el sistema es cerrado, con extracción de los gases de proceso y con la carga de los concentrados, el aire y los aditivos en el horno de fusión mediante lanzas. El sistema permite el reciclaje de las escorias del convertidor en el horno de fusión.

-El sistema más utilizado para la etapa de conversión en la producción de cobre es el convertidor "Pierce-Smith" debido a su alta capacidad de tratamiento de material y a su funcionamiento robusto y eficiente. Pese a ello, presenta el inconveniente de que la alimentación y transformación del material fundido se lleva a cabo mediante cuchara. La MTD consiste en reducir las pérdidas por vapores fugitivos que se producen al abrir el convertidor, utilizando campanas para la recogida de estos vapores e instalando sistemas de control automático para evitar el soplado de oxígeno durante el periodo de apertura.

-Para el electro-refinado se propone la optimización del tamaño y espaciado de las células, la utilización de técnicas más sofisticadas para la detección de cortocircuitos, y la recogida de los cátodos y el desprendimiento del cobre formado en los mismos de manera mecánica y automatizada. [6]

7.3.2. Mejoras en el proceso de producción de aluminio

Las MTD para el **proceso Bayer** de obtención de alúmina a partir de bauxita son: [6]

-El uso de digestores de tubos que pueden operar a temperaturas más elevadas, así como aceites térmicos para permitir la máxima recuperación de calor. Esto puede conseguir reducir la energía térmica necesaria para producir una tonelada de alúmina desde una media de 11 GJ a menos de 10 GJ.

-El uso de calcinadores de lecho fluido con precalentamiento para aprovechar el calor de los gases de escape.

-El desecho del lodo rojo en zonas cerradas con reutilización del agua de transporte. [7]

En el **proceso de reducción electrolítica** se propone el uso de células con alimentación multipunto automática de alúmina con las siguientes mejoras: [6]

-Reducción del consumo de electricidad y corrección de la concentración de alúmina gracias al control por ordenador de los parámetros operativos de las células (tensión, corriente y temperatura) a través de la simulación del proceso electrolítico con

modelos complejos de cinética, dinámica y campos magnéticos. La comparación de los parámetros con bases de datos permite también anticipar anomalías en el proceso.

- Cobertura completa de las células con una campana conectada al sistema de extracción y filtrado de gas.

- Reducción del tiempo empleado para abrir las cubiertas de las células y cambiar los ánodos cuando éstos se consumen. Implantación de un sistema para el mantenimiento programado de las células.

Para el **proceso de producción de aluminio secundario** se tienen como MTD:

- El secado de virutas, centrifugado u otros métodos para la eliminación de aceite, recubrimientos o residuos orgánicos presentes en la chatarra antes de su fusión, a menos que el horno esté específicamente diseñado para aceptar estos contenidos. [7]

- El molido y cribado de las escorias superficiales provenientes del proceso de producción primario para separar el óxido de la fracción principal de aluminio y posibilitar la reducción de la cantidad necesaria de fundentes salinos. Este proceso hace que por cada 100 kg de escoria superficial a fundir en el horno, se pase de necesitar 72 kg de fundente salino a 32,5 kg.

- Las fuentes de emisión de vapores en el horno de fusión de aluminio secundario cambian a lo largo del proceso. La MTD consiste en el diseño de un sistema de recogida de vapores cuyos ventiladores de recogida estén dirigidos a cada punto de emisión. Esto consigue focalizar su capacidad de recogida optimizando su consumo de energía. Se puede llevar a cabo mediante amortiguadores controlados automáticamente vinculados a los controles del horno, que se activen según convenga en función de la etapa que esté teniendo lugar.

Capítulo 8. Cronograma

Las actividades del presente TFG comenzaron en el verano del 2013 y su finalización se produjo prácticamente en su totalidad a finales de marzo de 2014 a espera de la elaboración final del documento y la presentación correspondiente. El tiempo estimado de dedicación es de 600 horas.

El cronograma de la figura 72 muestra la sucesión de las distintas fases para la elaboración del TFG.

Figura 72: Cronograma

	2013												2014																										
	Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo				Abril		
Contacto con el tema, decisión de la organización y el alcance del TFG																																							
Búsqueda de información general, análisis de las fuentes y recursos disponibles																																							
Búsqueda de información particular																																							
Índice y Capítulo 2: "Definiciones y conceptos de ahorro y eficiencia energética"																																							
Capítulo 3:"Contexto energético y de eficiencia actual"																																							
Capítulo 4:"Análisis de sistemas y procesos industriales generales"																																							
Capítulo 5:"Industria del papel"																																							
Capítulo 6:"Industria siderúrgica"																																							
Capítulo 7:"Industria metalúrgica"																																							
Capítulo 8:"Conclusiones"																																							
Capítulo 9: "Cronograma"																																							
Capítulo 10: "Presupuesto"																																							
Capítulo 11:"Referencias bibliográficas"																																							
Capítulo 1: "Introducción"																																							

Capítulo 9. Presupuesto

Título del TFG:

"Eficiencia energética en la industria electrointensiva sectores: metalurgia, siderurgia y papel"

Duración: 9 meses (600 horas)

Recursos:

Coste del recurso

1 trabajador, categoría "técnico junior" (15€/h): 600h.....	9.000€
iMac 21,5 de 2013 (amortización de 36 meses; 9 meses de uso).....	325€
Pendrive Sandisk Cruzer Edge 32 Gb.....	20€
Material de oficina, fotocopias y consumibles.....	200€
Conexión a internet (20€/mes).....	180€
TOTAL.....	9.725€

El presupuesto total del presente Trabajo de Fin de Grado asciende a 9.725 € + IVA

Capítulo 10. Conclusiones

10.1. Conclusiones técnicas

Se han alcanzado los objetivos propuestos para el Trabajo de Fin de Grado, habiéndose descrito los sistemas y procesos generales y particulares presentes en cada uno de los tres sectores industriales objeto de estudio. Se han identificado las principales medidas y mejores técnicas disponibles para el aumento la eficiencia energética en estos sectores.

Adicionalmente se ha llevado a cabo un estudio de la situación energética general y en el sector industrial para el ámbito mundial y español. Este estudio pone de manifiesto la importancia de llevar a cabo las distintas medidas que se han identificado para alcanzar el potencial de ahorro energético presente en la industria a fin de conseguir la disminución de la dependencia energética y la mejora de la competitividad industrial.

Proporcionar cifras concretas del potencial de ahorro energético para cada uno de los sectores estudiados resulta muy complicado ya que, pese a haberse indicado de forma general los márgenes de ahorro energético y de amortización de la inversión para los casos en los que se dispone de información, las características y funcionamiento particulares de cada planta industrial serán en última instancia las que determinen el potencial de ahorro.

El refuerzo del actual sistema de auditorías energéticas del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 posibilitaría la adecuada valoración de las posibilidades reales para el ahorro energético en cada caso particular. A este respecto, destaca la nueva Directiva 2012/27/UE, la cual impone la obligación de realizar auditorías obligatorias cada cuatro años. Resulta al mismo tiempo de interés el impulso de las ESEs orientadas al sector industrial.

Las posibilidades para el ahorro energético se fundamentan tanto en la implantación de las MTD identificadas para los procesos productivos de las industrias estudiadas, como de las medidas horizontales para la mejora de la eficiencia energética en cualquier planta industrial. Respecto a las tecnologías horizontales estudiadas destacan los siguientes aspectos:

- Consideración del ciclo total de vida de los motores eléctricos de alta eficiencia y los variadores de frecuencia en su adquisición. Su instalación conjunta presenta ahorros aproximados en el consumo eléctrico de los motores del 20 al 30% con tiempos razonables de retorno de la inversión.

- Valoración de la necesidad de compensar el consumo de energía reactiva, identificando el sistema (fijo o variable) y configuración más adecuados para la situación, así como la necesidad de neutralizar los efectos de los armónicos mediante filtros.
- Realización de un estudio completo del sistema de iluminación valorando los márgenes de ahorro potencial mediante el uso de tecnología LED y/o sistemas inteligentes de control.
- Estudio del potencial existente para la instalación de sistemas de cogeneración en la planta industrial, el cual, de acuerdo a lo visto en el capítulo 4, sigue siendo de forma general muy elevado para el sector industrial español (potencial inexplorado de en torno al 46%).

10.2. Conclusiones personales

La realización de este TFG ha complementado mi formación como ingeniero eléctrico, otorgándome un amplio conocimiento en el ámbito energético nacional e internacional y más en particular en lo relativo a los aspectos técnicos para la consecución del ahorro y la eficiencia energética en los entornos industriales.

He desarrollado en gran medida mis habilidades para la búsqueda, filtrado, extracción, interconexión y exposición de información de numerosas fuentes y, en definitiva, he situado el sector de la consultoría energética como el principal candidato al que orientar mi formación de postgrado y mi futuro profesional.

Capítulo 11. Referencias bibliográficas

Capítulo 2

[1] Directiva 2006/32 CE del Parlamento Europeo del Consejo, 5 de abril de 2006

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0064:0064:ES:PDF>

[2] <http://www.sinceo2.com/es/estudios/objetivos-beneficios.html>

[3] Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid Procedimiento de auditorías energéticas en el sector industrial de la Comunidad de Madrid
<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-auditorias-energeticas-en-el-sector-industrial.pdf>

[4] Instituto Tecnológico de Energía “Modelo de negocio de servicios energéticos, ESE/ESCOS”, Junio 2010
<http://eficienciaenergetica.femeval.es/Documentos/empresas%20de%20servicios%20en%20ergeticos.pdf>

[5] Energylab, “Empresas de Servicios Energéticos (ESE): Un nuevo modelo de negocio”, Noviembre 2011 http://www.energylab.es/fotos/111114115935_pJzW.PDF

[6] Aiteco, Indicadores de Gestión en la Administración Pública
<http://www.aiteco.com/indicadores-de-gestion/>

[7] Schneider Electric, “Catálogo de Soluciones y Servicios de Eficiencia Energética”
<http://www.schneiderelectric.es/documents/local/soluciones/servicios-eficiencia-energetica.pdf>

[8] IDAE, “Balances energéticos anuales. Periodo: 1990 - 2011”
[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Copia_de_Balances_MINETUR_IDAE_Valores_Web_\(2\)_56409170.xls](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Copia_de_Balances_MINETUR_IDAE_Valores_Web_(2)_56409170.xls)

[9] AEGE, “Servicio de Gestión de la Demanda de Interrumpibilidad”, Oviedo, 9 de mayo de 2013.

http://www.aege.biz/conf/130509_PRESENTACION_AEGE_JT_SGE_Oviedo.pdf

[10] Ministerio de Industria Turismo y Comercio, Secretaria de Estado de la Energía, “Planificación de los sectores de electricidad y gas 2012-2020, Desarrollo de las redes de transporte”, Julio 2011

http://www.minetur.gob.es/energia/es-ES/Novedades/Documents/PlanificacionElectricidadGas_2012_2020.pdf

[11] REE, Operación del sistema, Gestión de demanda

<http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema/gestion-de-demanda>

[12] Organización Latinoamericana de Energía, "Manual de Estadísticas Energéticas", Año 2011.

http://www.olade.org/sites/default/files/img_publicaciones/Manual%20de%20Estadisticas%20Energeticas%20de%20OLADE.pdf

[13] IDAE, "Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020"

http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11905_PAEE_2011_2020_A2011_Aa1e6383b.pdf

[14] Datos Macro, PIB de España

<http://www.datosmacro.com/pib/espana>

[15] Gobierno de España, Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, Indicadores http://servicios2.marm.es/sia/indicadores/ind/ficha.jsp?cod_indicador=18&factor=det

[16] Banco Mundial, Indicadores, Valor añadido de la industria (%del PIB), 2011

<http://datos.bancomundial.org/indicador/NV.IND.TOTL.ZS>

[17] Instituto Nacional de Estadística, "Índices de producción industrial 2013"

<http://www.ine.es/daco/daco42/daco422/ipi1013.pdf>

[18] Banco Mundial, Indicadores, Uso energético per cápita ,2011

http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?order=wbapi_data_value_2011+wbapi_data_value&sort=asc

[19] Banco Mundial, Indicadores, Consumo de electricidad per cápita, 2011

http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?order=wbapi_data_value_2011+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=asc

[20] Enerdata, "Odyssey, the Europe energy efficiency project"

<http://www.enerdata.net/enerdatauk/solutions/data-management/odyssey.php>

[21] Comisión Nacional de la Energía, "Consideraciones sobre el ahorro y la eficiencia energética: Intensidad energética y gestión de la demanda"

http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/PA006_03cap9.pdf

[22] IDAE, “Informe anual de indicadores energéticos. año 2011”
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Boletin_Indicadores_Relevantes_2011_240413_485122fa.pdf

[23] Banco Mundial, Indicadores, Importaciones de energía, 2012

<http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.IMP.CON.S.ZS>

[24] IDAE, “Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020”

http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11905_PAEE_2011_2020_A2011_A_a1e6383b.pdf

[25] IDAE, “Plan de Energías Renovables 2011-2020”

http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_PER_2011-2020_def_93c624ab.pdf

[26] Banco Mundial, Indicadores, Emisiones de CO₂ per cápita, 2010

http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?order=wbapi_data_value_2010+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=desc

[27] Banco Mundial, indicadores, Emisiones de CO₂ respecto al PIB, 2010

http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PP.GD?order=wbapi_data_value_2010+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=desc

[28] Plan Europeo de Eficiencia Energética 2011-2020, página 2 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:ES:PDF>

[29] <http://www.sabidurias.com/cita/es/2619/albert-einstein/hay-una-fuerza-motriz-mas-poderosa-que-el-vapor-la-electricidad-y-la-energia-atmica-la-voluntad>

[30] Naciones Unidas, World Commission on Environment and Development: “Our Common Future” <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>

[31] Energía y Sociedad, "Seguridad de suministro y diversificación energética"

http://www.energiaysociedad.es/documentos/11_1_seguridad_de_suministro_y_diversificacion_energetica.html

[32] Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de enero de 2008 relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:024:0008:0029:es:PDF>

Capítulo 3

- [1] IEA, “World Energy Outlook 2011”, pág 69
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf
- [2] ACEEE, “International Energy Efficiency Scorecard 2012”
<http://www.cliclavoro.gov.it/approfondimenti/Documents/International%20Energy%20Efficiency%20Scorecard.pdf>
- [3] IEA, “World Energy Outlook 2013”, Resumen Ejecutivo
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Spanish.pdf>
- [4] U.S. Energy Information Administration, “Today in Energy”, 2013.
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12251>
- [5] World Energy Council, “World Energy Perspective”, 2013
<http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WEC-Energy-Efficiency-Policies-report.pdf>
- [6] The Club of Rome, "Historia del Club de Roma"
<http://www.clubofrome.org/?p=4781>
- [7] Naciones Unidas, “Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático” <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- [8] ISO, "ISO5001: Gestión de la energía" http://www.iso.org/iso/iso_50001_energy-es.pdf
- [9] IDAE, “La etiqueta energética”
<http://www.idae.es/index.php/idpag.57/relcategoria.1161/relmenu.67/mod.pags/mem.de.talle>
- [10] MINETUR, “Informe anual 2012”<http://www.minetur.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/Informes/InformesMITYC/Informe+Anual+de+la+S.G.+de+Estudios,+An%C3%A1lisis+y+Planes+de+Actuaci%C3%B3n/Informe+Anual+2012.pdf>
- [11] MINETUR, “La Energía en España 2011” http://www.minetur.gob.es/energia/es-es/documents/energia_espana_2011_web.pdf
- [12] European Commission, “EU Energy in figures”, 2013
http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2013_pocketbook.pdf
- [13] MINETUR, “Planificación de los sectores Electricidad y Gas 2012-2020”, Julio 2011
http://www.minetur.gob.es/energia/es-ES/Novedades/Documents/PlanificacionElectricidadGas_2012_2020.pdf

- [14] AEGE, "La visión de la industria básica electro-intensiva", Eduardo Gil, Julio 2013, http://www.aege.biz/conf/130720_Presentacion_AEGE_Unidad_EditorialEG1.pdf
- [15] BOE-A-1981-1898, Ley 82/1980, de 30 de diciembre, sobre conservación de energía https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1981-1898
- [16] Plan de acción sobre eficacia energética (2000-2006)
http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/127033_es.htm
- [17] Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0064:0064:ES:PDF>
- [18] Plan de acción para la eficiencia energética (2007-2012)
http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/127064_es.htm
- [19] Consejo Europeo de Bruselas de 8 y 9 de marzo de 2007, "Conclusiones de la presidencia" <http://register.consilium.europa.eu/pdf/es/07/st07/st07224-re01.es07.pdf>
- [20] Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de Noviembre de 2010 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:es:PDF>
- [21] Comisión Europea, Plan de Eficiencia Energética 2011
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:ES:PDF>
- [22] Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de Octubre de 2012 <http://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>
- [23] Planificación energética indicativa según lo dispuesto en la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible http://www.minetur.gob.es/energia/es-ES/Participacion/Documents/Planificacion%20Energetica/PlanificacionEnergeticaIndicativa_2020.pdf
- [24] Observatorio industrial del sector metal, "Los grandes consumidores de energía eléctrica: Coste y eficiencia energética"
http://www.minetur.gob.es/industria/observatorios/SectorMetal/Actividades/2011/MCA-UGT/Los_Grandes_Consumidores_de_Energia_Electrica_Coste_y_Eficiencia_Energetica.pdf
- [25] Energía y Sociedad, "Objetivos y normativa en España de la eficiencia energética"
http://www.energiaysociedad.es/documentos/8_3_objetivos_y_normativa_en_espana_de_la_eficiencia_energetica.doc
- [26] IDAE, "Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020"
http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11905_PAEE_2011_2020_A2011_A_a1e6383b.pdf

[27] IDAE, "Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020, Resumen Ejecutivo"
http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11905_PAEE_2011_2020_Resumen_A2011_5f2aa771.pdf

Capítulo 4

[1] IEA, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems ", 2011
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_for_ElectricSystems.pdf

[2] United Nations Industrial Development Organization "Energy efficiency in electric motor systems: Technology, saving potentials and policy options for developing countries", Vienna 2012
http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Publications/Research_and_statistics/Branch_publications/Research_and_Policy/Files/Working_Papers/2011/WP112011%20Energy%20Efficiency%20in%20Electric%20Motor%20Systems.pdf

[3] Eficiencia en Motores, Nuevos desarrollos y tecnologías ABB, "IE4 Super Premium y SIMM IE4"

[http://www02.abb.com/global/clabb/clabb151.nsf/0/04495610dc2495a3c1257b9d0046ccca/\\$file/3+Jos%C3%A9+Simpson+-+Eficiencia+en+Motores,+Nuevos+desarrollos+y+tecnolog%C3%ADas+ABB.pdf](http://www02.abb.com/global/clabb/clabb151.nsf/0/04495610dc2495a3c1257b9d0046ccca/$file/3+Jos%C3%A9+Simpson+-+Eficiencia+en+Motores,+Nuevos+desarrollos+y+tecnolog%C3%ADas+ABB.pdf)

[4] General Electric Industrial Systems, "Evaluation and Application of Energy Efficient Motors"
<http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/e-GEA-M1019?TNR=White%20Papers|e-GEA-M1019|generic>

[5] Copper Development Association Inc., "Introduction to Premium Efficiency Motors"
http://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/education/motor_text.html

[6] European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics, "Previous motor efficiency classes"
<http://www.cemep.org/index.php?id=53>

[7] European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics, "New efficiency classes for low-voltage three-phase motors (IE-Code)"
<http://www.cemep.org/index.php?id=53>

[8] IEC, "Energy Efficient Motors", July 2012
http://www.iec.ch/etech/2012/etech_0712/ca-1.htm

[9] Energylab, Centro tecnológico de eficiencia y sostenibilidad energética, " Eficiencia en motores eléctricos" Barcelona, 2009

https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.gge.es%2Farmari%2Fgge%3Agge%2F2%2Fdownload.pdf&ei=20z3UszcGqHA7Abqi4HQCQ&usg=AFQjCNGsynYx94aL9PBfth6FF_1bh_nocAg&bvm=bv.60983673,d.ZGU&cad=rja

[10] ABB, "Convertidores y motores ABB para mejorar la eficiencia energética"
[http://www02.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/82e2977496a079b0c1257a5c00734f79/\\$FILE/Brochure+Convertidores+y+Motores%2520para+mejorar+la+eficiencia+energetica.pdf](http://www02.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/82e2977496a079b0c1257a5c00734f79/$FILE/Brochure+Convertidores+y+Motores%2520para+mejorar+la+eficiencia+energetica.pdf)

[11] Siemens, "Nuevas clases de eficiencia para motores FAQ's"
https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/drive_tech/motores/Pages/motores_alta_eficiencia_faqs_1.aspx

[12] Open Course Ware Universidad de Sevilla, "Leyes de semejanza en bombas"
http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_10.htm

[13] Open Course Ware Universidad Carlos III de Madrid Depto. Ingeniería Eléctrica, "Máquinas eléctricas de corriente alterna, Capítulo 2 Máquina Asíncrona" David Santos Martín <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/maquinas-electricas-de-corriente-alterna/material-de-clase-1/capitulo-ii-maquina-asincrona>

[14] Open Course Ware Universidad Carlos III de Madrid Depto. Ingeniería Eléctrica, "Máquinas eléctricas de corriente alterna, Capítulo 3 Máquina Síncrona" David Santos Martín <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/maquinas-electricas-de-corriente-alterna/material-de-clase-1/capitulo-iii-maquina-sincrona>

[15] Universidad de León "Control de variadores, Configuración de un variador como motor" <http://lra.unileon.es/es/book/export/html/316>

[16] ABB, "ACS55, ACS150, ACS310, ACS355, ACS550, Convertidores de frecuencia para el control preciso del motor y ahorro energético, Catálogo y lista de precios"
<http://es.scribd.com/doc/219222135/Cplementaria-ABB-variadores-pdf>

[17] IEA, "Walking the torque: Proposed work plan for energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems"
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Walking_the_Torque.pdf

[18] RTR Energía, "Compensación de la energía reactiva"
http://www.rtrenergia.es/rtr/ficheros/reactiva_2012.pdf

[19] BOE, Orden ITC/3519/2009 <http://www.boe.es/boe/dias/2009/12/31/pdfs/BOE-A-2009-21173.pdf>

- [20] Asociación Nacional de Ahorro y Eficiencia Energética (ANAE), “Penalizaciones por energía reactiva” <http://www.asociacion-anae.org/sites/default/files/reactiva.pdf>
- [21] Schneider Electric, “Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos”, Catálogo tarifa septiembre 2009
<http://www.schneiderelectric.es/sites/spain/es/productos-servicios/distribucion-electrica/descarga/catalogo-tarifa-compensacion-reactiva.pdf>
- [22] Schneider Electric, “Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos”, Capítulo 5
<http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap5.pdf>
- [23] Schneider Electric, “5. Detección y filtrado de armónicos”
http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Guia/5_Armonicos.pdf
- [24] IEEE-UNED, “Boletín Electrónico, 15 Septiembre 2005”
<http://www.ieec.uned.es/webIEEE/sb/boletin/boletin%20n3Final%202mc.pdf>
- [25] Schneider Electric, “AccuSine Filtro activo de armónicos”
<http://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-tecnicas-ecoestruxure/AccuSine/Accusine-Filtro-activo-de-armonicos.pdf>
- [26] UNE-EN 12464-1, Octubre 2003
https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDQQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.leds-c4.com%2Fdoc%2F16652%2F195e631bbd79f32f68746b262a19e610%2FUNE-EN_12464-1_2003.pdf&ei=0R39Uve7FaeV7Qarj4GABA&usg=AFQjCNE-KCHrgWZJNBcFtWqRtLu4f6MzJg&bvm=bv.61190604,d.ZGU&cad=rja
- [27] Gas Natural Fenosa, empresa eficiente, “Iluminación industrial” <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/iluminacion-industrial>
- [28] VP ingenieros, “Eficiencia del LED”
<http://www.vpingenieros.es/eficiencia-led.html>
- [29] IDAE, guía técnica para la medida y determinación del calor útil, de la electricidad y del ahorro de energía primaria de cogeneración de alta eficiencia”, Abril 2008
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Guia_calculo_calor_util_Hchp-Echp-PES_c24e48c1.pdf
- [30] BOE, Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-10556>
- [31] Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020
http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11905_PAEE_2011_2020_A2011_A_a1e6383b.pdf

[32] IDAE, Boletín de estadísticas energéticas de cogeneración, año 2011 http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Boletin_Estadisticas_CHP_2011_feb13_OK2_rev_cbecf1fc.pdf

[33] Enagas, “La Cogeneración a Gas, motor de la sostenibilidad industrial”, Vigésimo octava reunión, Comité de Seguimiento del Sistema Gasista 14 de julio de 2010, José Luis Ortega Rojo

<http://www.enagas.es/cs/BlobServer?blobcol=urldata&blobtable=MungoBlobs&blobkey=id&blobwhere=1146251552013&blobheader=application%2Fpdf>

[34] Acogen, “Aportaciones de la Cogeneración a la economía, al empleo industrial y al Sistema Eléctrico y en España”, Javier Rodríguez Morales, 7 de Noviembre 2012

http://www.uclm.es/fundacion/rse/2012/pdf/presentaciones/X7_M1_ACOGEM.pdf

[35] IDAE, “Análisis del potencial de cogeneración de alta eficiencia en España 2010-2015-2020”

http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Informe_Potencial_Cogeneracion_en_Espana_7083bc9d.pdf

[36] Acogen, “Cogeneración en la Industria Papelera”, Marzo 2013.
<http://www.acogen.org/post/informe-acogen-cogeneracion-sector-papelero-marzo-2013.pdf>

[37] AESA, “Modernización de instalaciones de cogeneración”, Raimon Argemi Puigdomenech, 26 de Febrero 2009
<http://www.iirspain.com/descargadoc/archivos/BS371/IIR26Feb09RArgemi.pdf>

Capítulo 5

[1] Green Peace, "El Futuro de la producción de celulosa y las técnicas de producción más favorables para el medio ambiente", Campaña tóxicos, Febrero 2006

<http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2006/4/el-futuro-de-la-produccion-de.pdf>

[2] SCA, "Fabricación de papel", Soporte técnico de los papeles para SCA Publication Papers

http://www.sca.com/Global/Publicationpapers/pdf/Brochures/Papermaking_ES.pdf

[3] Oficina Internacional del Trabajo, "Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo", "Capítulo 72: Industria del papel y de la pasta de papel", 1998

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/72.pdf>

[4] Comisión Europea / Gobierno de España, Ministerio de Medio Ambiente, "Documento BREF de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de la Pasta y el Papel", 2006

[http://www.prtr-es.es/data/images/BREF%20Pasta%20y%20Papel%20\(versi%C3%B3n%20en%20castellano\)-7C4A350C484D6A0E.pdf](http://www.prtr-es.es/data/images/BREF%20Pasta%20y%20Papel%20(versi%C3%B3n%20en%20castellano)-7C4A350C484D6A0E.pdf)

[5] Universidad de Barcelona, Ecología Forestal: Estructura, Funcionamiento y Producción de las masas forestales "La madera: estructura, función, formación y mantenimiento", Dr. Carlos A. Gracia

http://www.ub.edu/ecologia/Carlos.Gracia/PublicacionesPDF/La_madera.pdf

[6] Micelio, Diccionario micológico, Hemicelulosa

http://www.micelio.es/hongosbf/diccionario-micologico/H_64_hemicelulosa

[7] Filtros Anoia S.A, FilterLab, "Control de calidad y definiciones técnicas"

<http://www.fanoia.com/filterlab/lab-9-10.pdf>

[8] Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, PRTR, "Resumen Ejecutivo BREF Pasta y Papel"

<http://www.prtr-es.es/Data/images//Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Pasta%20y%20Papel-C01ECC9B7FD0DB66.pdf>

[9] Abelló Linde S.A, "Deslignificación con Oxígeno"

http://www.abellolinde.es/es/processes/cleaning_polishing_grinding/bleaching/oxygen_delignification/index.html

[10] IDAE, Energías Renovables, Energía de la Biomasa "Biomasa: Digestores anaerobios",

2007 http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf

[11] CEOE, Jornada sobre eficiencia energética en la industria,

Torraspapel, "Experiencias de eficiencia energética en la industria: sector papelero",
Marzo 2014

http://www.ceoe.es/resources/image/presentacion_torraspapel_2014_03_18.pdf

Capítulo 6

[1] Universidad Autónoma de Madrid aceros: aleaciones hierro-carbono

<http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>

[2] Open Course Ware Universidad de Cantabria, Dpto.

de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, "Metalurgia y siderurgia, bloque 4: siderurgia"

<http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/metalurgia-y-siderurgia/materiales/Bloque%204%20Siderurgia.pdf>

[3] Asociación para la Promoción Técnica del Acero, "El ciclo del acero"

http://www.apta.com.es/index.php?option=com_content&task=blogsection&id=8&Itemid=36

[4] World Steel Association, Environmental sustainability, "Climate change"

<http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainable-steel/environmental/climate-change.html>

[5] EPA, Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos, "AP42, Volume 1, Chapter 12, Metallurgical Industry, Iron and Steel Production"

<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/final/c12s05.pdf>

[6] Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente,

Centro nacional de referencia sobre contaminantes orgánicos persistentes, Plantas de sinterización en la industria del hierro y el acero <http://www.cnrcop.es/gc/iniciativas-no-gubernamentales/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/procesos->

[termicos-de-la-industria-metalurgica/plantas-de-sinterizacion-en-la-industria-del-hierro-y-el-acero/](#)

[7] European Commision, "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)", Marzo 2012.

http://www.prtr-es.es/Data/images/IronandSteel_Adopted_03_2012pdf.pdf

[8] Diario Oficial de la Unión Europea, "Decisión de ejecución de la comisión de 28 de febrero de 2012 por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores tecnologías disponibles (MTD) en la producción siderúrgica conforme a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las emisiones industriales"

http://www.prtr-es.es/Data/images//DECISION_2012_135UE_Conc.MTD_siderurgia_es-D45F5B669A87D5A3.pdf

[9] Fuenvesa, Peletización

<http://www.funvesa.com.pe/esp/peletizacion>

Capítulo 7

[1] Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento Ciencia Materiales "Metalurgia y Materiales", Profesor: Mauricio Narváez, 2007

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=27&ved=0CEkQFjAGOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.ramos.utfsm.cl%2Fdoc%2F77%2Fsc%2FM yM_0_2008_1.ppt&ei=1eY2U6vDB9Kv7Aar-IGADQ&usg=AFQjCNEVSmG80JMrqhwKvWZ8IrruS-4o1Q&bvm=bv.63808443,d.ZG4&cad=rja

[2] Open Course Ware Universidad de Cantabria, Dpto. de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales, "Metalurgia y Siderurgia, Metalurgia de los metales no féreos, Metalurgia del Cobre" María Luisa Payno Herrera, Jesús Setién Marquínez

<http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/metalurgia-y-siderurgia/materiales/Bloque%203.3%20cobre.pdf>

[3] AIM, Asociación de Ingenieros Industriales de Madrid, "La Metalurgia del Cobre" José Arlandis Rubio, Ingeniero Industrial. Director de Estudios y Desarrollo Corporativo de Atlantic Copper, S.A, 1999

http://www.aim.es/publicaciones/bol2/13_Metalurgia_Cobre.pdf

[4] Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), "Procesos productivos, Chancado y molienda", Patricio Cuadra, Codelco Central

https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_chancado_y_molienda.asp

[5] Open Course Ware Universidad de Cantabria, Dpto. de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales, "Metalurgia y Siderurgia, Metalurgia de los metales no féreos, Metalurgia del Aluminio" María Luisa Payno Herrera, Jesús Setién Marquínez

<http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/metalurgia-y-siderurgia/materiales/Bloque%203.1%20aluminio.pdf>

[6] Comisión Europea/ Ministerio de Medio Ambiente, "Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales no féreos, Documento BREF, Parte I"

[http://www.prtr-es.es/Data/images//BREF%20Metalurgia%20no%20f%C3%A9rrea%20I%20\(versi%C3%B3n%20en%20castellano\)-2C746F674B7D7C7D.pdf](http://www.prtr-es.es/Data/images//BREF%20Metalurgia%20no%20f%C3%A9rrea%20I%20(versi%C3%B3n%20en%20castellano)-2C746F674B7D7C7D.pdf)

[7] Comisión Europea/ Ministerio de Medio Ambiente, "Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales no férreos, Documento BREF, Parte II"

[http://www.prtr-es.es/Data/images//BREF%20Metalurgia%20no%20f%C3%A9rrea%20II%20\(versi%C3%B3n%20en%20castellano\)-C86C6CEFD2372403.pdf](http://www.prtr-es.es/Data/images//BREF%20Metalurgia%20no%20f%C3%A9rrea%20II%20(versi%C3%B3n%20en%20castellano)-C86C6CEFD2372403.pdf)

[8] TEFSA Técnicas de Filtración S.A., Espesadores Lasmert, Principio de funcionamiento

<http://www.gruptefsa.com/sp/el.htm>